

Carlos Ivorra Castillo

**PRUEBAS DE
CONSISTENCIA**

C'est du mystère seul que l'on a peur. Il faut qu'il n'y a plus de mystère. Il faut que des hommes soient descendus dans ce puits sombre, et en remontent, et disent qu'ils n'ont rien rencontré.

ANTOINE DE SAINT-EXUPÉRY

Índice General

Introducción	ix
Capítulo I: Preliminares	1
1.1 La jerarquía de Lévy I	3
1.2 La teoría de conjuntos de Kripke-Platek	4
1.3 La jerarquía de Lévy II	6
1.4 La formalización de la lógica	11
1.5 Consistencia y existencia de modelos	17
Capítulo II: Modelos de ZF	19
2.1 Relativización de expresiones	19
2.2 Modelos transitivos, expresiones absolutas	25
2.3 Los modelos V_λ	32
2.4 Colapsos transitivos	40
2.5 Los modelos $H(\kappa)$	48
2.6 La parte bien fundada de un modelo	53
Capítulo III: Constructibilidad	63
3.1 Definibilidad	64
3.2 La jerarquía constructible	70
3.3 El axioma de constructibilidad	77
3.4 El buen orden constructible	82
3.5 Los modelos $L_\lambda[A]$	86
3.6 Argumentos de condensación	93
3.7 Cardinales inaccesibles en L	100
3.8 El teorema de Lévy-Shoenfield	105
Capítulo IV: Extensiones genéricas	109
4.1 Modelos booleanos	110
4.2 Extensiones con álgebras de Boole	119
4.3 Conjuntos preordenados	124
4.4 Modelos genéricos	131
4.5 Primeros ejemplos y aplicaciones	147
4.6 Hechos adicionales	150

Capítulo V: Aplicaciones de las extensiones genéricas	159
5.1 Conservación de cardinales	159
5.2 Familias cuasidisjuntas	164
5.3 Extensiones con funciones parciales	166
5.4 Productos	175
5.5 El teorema de Easton	177
5.6 Colapso de cardinales	184
5.7 Construcción de árboles de Suslin	188
5.8 Diamantes y la hipótesis de Kurepa	190
Capítulo VI: La independencia del axioma de elección	197
6.1 Conjuntos hereditariamente definibles por ordinales	197
6.2 Constructibilidad relativa	209
6.3 Modelos simétricos	216
6.4 Extensiones simétricas	227
6.5 Ejemplos de extensiones simétricas	235
Capítulo VII: El teorema de los ultrafiltros	251
7.1 El primer modelo de Cohen	251
7.2 TU no implica AE	266
7.3 Formas débiles de TU	272
7.4 Apéndice: El teorema de Halpern-Läuchli	275
Capítulo VIII: Extensiones iteradas y el axioma de Martin	287
8.1 Productos generalizados	288
8.2 Iteraciones de preórdenes	297
8.3 La consistencia del axioma de Martin	305
8.4 Consecuencias topológicas de AM	312
8.5 Árboles de Aronszajn especiales	316
Capítulo IX: Aplicaciones de las extensiones iteradas	321
9.1 Cardinales característicos	321
9.2 p -puntos en ω^*	331
9.3 Huecos en ${}^\omega\omega$ o en $\mathcal{P}\omega$	335
9.4 El axioma de las coloraciones abiertas	347
9.5 Aplicaciones del axioma de las coloraciones abiertas	363
Capítulo X: Extensiones propias	369
10.1 Preórdenes propios	370
10.2 Preórdenes α -propios	378
10.3 Iteración de extensiones propias	382
10.4 Conservación de $\mathcal{P}\omega$	394
10.5 C.p.o.s propios sobre isomorfismos	405
10.6 Acotación de ${}^\omega\omega$	412

Capítulo XI: Aplicaciones de las extensiones propias	419
11.1 Un modelo sin p-puntos	420
11.2 Especialización de árboles de Aronszajn	431
Apéndice A: Extensiones sin álgebras de Boole	453
Apéndice B: Conjuntos cerrados no acotados y estacionarios	463
B.1 Subconjuntos de $\mathcal{P}_\kappa A$	463
B.2 Subconjuntos de $\mathcal{P}_{\aleph_1}^\alpha A$	467
Bibliografía	471
Índice de Materias	473

Introducción

A los largo del siglo XX, los matemáticos fueron asimilando un fenómeno que en el siglo anterior nadie se había planteado: nadie dudaba de que existen problemas matemáticos tan complejos que es prácticamente seguro que nunca serán resueltos, incluso se sabía que hay problemas que no tienen solución, pero lo que difícilmente habrían imaginado los matemáticos decimonónicos es que hay afirmaciones que no pueden ser demostradas ni refutadas y, más aún, que puede demostrarse que así es (en casos concretos).

El primer ejemplo de esta situación con la que se encontraron los matemáticos fue la hipótesis del continuo (HC). Los problemas mentales que sufrió Georg Cantor en la última etapa de su vida se debieron en gran parte a la frustración por no poder demostrar ni refutar lo que más tarde se probó que era una afirmación indecidible. Cantor había llegado a demostrar que cada conjunto infinito, en particular el conjunto \mathbb{R} de los números reales, tiene un cardinal únicamente determinado. Incluso pudo encontrar una expresión algebraica para el cardinal de \mathbb{R} , a saber, $|\mathbb{R}| = 2^{\aleph_0}$, e incluso pudo demostrar la desigualdad $2^{\aleph_0} \geq \aleph_1$ y, aunque conjeturó que $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ (la hipótesis del continuo), no descartó la posibilidad de que su conjetura fuera errónea y que en realidad fuera $2^{\aleph_0} > \aleph_1$. Sin embargo, lo que nunca sospechó es que podría darse el caso de que, en cierto sentido, sólo una de las dos opciones es posible (pues una contradice a la otra), pero que, en otro sentido, las dos son posibles, en el sentido de que ni se puede demostrar una ni la otra.

Esto es algo que hoy en día todos los matemáticos tienen asumido, si bien son pocos los matemáticos que sabrían, no ya demostrar que la hipótesis del continuo es indecidible, sino siquiera explicar someramente por qué es así, o cómo se sabe que es así. También es “de dominio público” entre los matemáticos que la hipótesis del continuo sólo es una entre muchas afirmaciones indecidibles, y que éstas no se restringen al ámbito de la teoría de conjuntos, sino que podemos encontrar otras relativas al análisis matemático, a la topología, al álgebra e incluso a la teoría de números.

El propósito de este libro es proporcionar al lector las técnicas básicas que permiten demostrar la indecidibilidad de una gran variedad de afirmaciones matemáticas. El primer paso en esta dirección es advertir que todos los teoremas que los matemáticos consideran “demostrados”, pueden demostrarse en el sentido preciso de la palabra “demostración” que proporciona la lógica matemática a partir de los axiomas de la teoría de conjuntos de *Zermelo-Fraenkel ZFC* (ex-

cepto aquellos que usan explícitamente axiomas adicionales, como la hipótesis del continuo, el diamante de Jensen, etc.) De este modo, demostrar que una afirmación es indecidible, es decir, que un matemático jamás llegará a demostrarla o a refutarla por más que se esfuerce, equivale a demostrar que no puede demostrarse ni refutarse formalmente a partir de los axiomas de ZFC. Esto supone una enorme concreción del problema.

Observemos que es equivalente decir que una afirmación ϕ no es demostrable en ZFC que decir que $ZFC + \neg\phi$ es consistente, es decir, que no puede llegarse a ninguna contradicción por añadir $\neg\phi$ a los axiomas de ZFC. Esto se debe a que si suponiendo $\neg\phi$ llegáramos a una contradicción tendríamos una demostración de ϕ por reducción al absurdo y, recíprocamente, si pudiéramos demostrar ϕ en ZFC, entonces en $ZFC + \neg\phi$ podríamos demostrar $\phi \wedge \neg\phi$.

Por ejemplo, que la HC no sea demostrable equivale a que $ZFC + \neg HC$ sea consistente, y que no sea refutable equivale a que $ZFC + HC$ sea consistente. Vemos así que una prueba de indecidibilidad (o de independencia) equivale a dos pruebas de consistencia. La independencia de HC es la consistencia de HC más la de $\neg HC$. Es frecuente que, a la hora de probar que una afirmación ϕ es indecidible, los argumentos empleados para probar que ϕ es consistente sean bastante distintos de los que prueban que $\neg\phi$ es consistente, por lo que en realidad las técnicas que vamos a exponer aquí son técnicas de “pruebas de consistencia”, de modo que una prueba de independencia se obtiene habitualmente juntando dos pruebas de consistencia que no tienen por qué tener gran relación entre sí.

En este punto conviene aclarar que en realidad es imposible demostrar algo así como que $ZFC+HC$ es consistente. A lo sumo podemos aspirar a una *prueba de consistencia relativa*, es decir, a demostrar que si ZFC es consistente entonces también lo es $ZFC+HC$. Esto se debe a que el segundo teorema de incompletitud de Gödel nos previene de la imposibilidad de demostrar que ZFC es consistente.

En efecto, en general, el segundo teorema de incompletitud afirma que si T es una teoría axiomática recursiva (y esto significa simplemente que tenemos un criterio para reconocer cuáles son sus axiomas) en la cual pueden definirse los números naturales y se pueden demostrar los axiomas de Peano, entonces la consistencia de T es equivalente a que se cumpla una cierta afirmación $\text{Consis } T$ que habla exclusivamente de números naturales (de hecho, puede expresarse como que una cierta ecuación polinómica con coeficientes naturales no tenga solución), y sólo se cumple

$$\vdash_T \text{Consis } T$$

en el caso trivial en que T es contradictoria. Más brevemente: una teoría consistente no puede demostrar su propia consistencia.¹

¹Hay un chiste que ilustra perfectamente el segundo teorema de incompletitud de Gödel: “Yo era un presuntuoso, pero fui a un psicólogo y me curó. Ahora ya soy perfecto.” Del mismo modo que alguien que afirme ser perfecto revela con ello que no lo es, porque tiene el defecto de la presunción, una teoría que afirme de sí misma ser consistente es necesariamente contradictoria.

Cuando aplicamos este resultado general al caso de ZFC debemos tener en cuenta que en ZFC pueden demostrarse formalmente todos los resultados que los matemáticos son capaces de demostrar. Si existiera un argumento que realmente “nos convenciera” de que ZFC es consistente, de modo que es imposible que alguien pueda traer jamás un papel con una demostración de que $0 \neq 0$ a partir de los axiomas de ZFC y totalmente respetuosa con las reglas de razonamiento lógico, tal argumento sería formalizable en ZFC, y se convertiría en una demostración de Consis ZFC en ZFC, y el teorema de incompletitud proporciona un procedimiento mecánico para derivar de ahí la demostración de una contradicción en ZFC.

Esto no debe hacernos recelar de la consistencia de ZFC, pues tal limitación no se debe a ninguna característica particular de ZFC que convierta a la teoría en especialmente “sospechosa”, sino que los teoremas de incompletitud de Gödel se aplican por igual a cualquier teoría “razonable” que sea lo suficientemente potente como para formalizar cualquier razonamiento que los matemáticos juzguen “aceptable”.

Así pues, Consis ZFC es un ejemplo de afirmación aritmética que, en caso de que sea cierta (es decir, en caso de que ZFC sea consistente) es necesariamente indemostrable.²

Obviamente entonces, si no podemos aspirar a demostrar la consistencia de ZFC, mucho menos podemos aspirar a demostrar la de ZFC+HC, y sólo podremos demostrar que ZFC+HC es “igual de segura” que ZFC, es decir, que si ZFC+HC es contradictoria es porque ya lo era ZFC, o que por tomar la HC como axioma adicional no podemos pasar de una teoría consistente a otra contradictoria.

El teorema de incompletitud de Gödel proporciona una técnica de pruebas de consistencia, pues si podemos demostrar que

$$\vdash_{\text{ZFC}} \phi \rightarrow \text{Cisis ZFC}$$

esto nos permite concluir que si ZFC es consistente entonces en ZFC no puede probarse ϕ , o de lo contrario podríamos probar Consis ZFC en ZFC. Ésta es una de las técnicas de pruebas de consistencia que estudiaremos en este libro,³ pero no será la más habitual. La prueba del segundo teorema de incompletitud es de naturaleza sintáctica, basada en técnicas de la teoría de la demostración, mientras que las pruebas que presentaremos aquí serán esencialmente semánticas, en un sentido que precisamos a continuación:

El planteamiento básico de ZFC es postular la existencia de unos objetos llamados “conjuntos” sin concretar de ningún modo lo que son. No existe ninguna definición operativa de lo que debemos entender por “conjunto”. Podemos decir que los conjuntos son “colecciones de objetos”, pero eso no ayuda en nada a determinar qué podemos afirmar y qué no podemos afirmar sobre los conjuntos.

²En ZFC, aunque trivialmente se puede demostrar en teorías como ZFC+Cisis ZFC.

³Por ejemplo, veremos que la negación de la hipótesis de Kurepa implica Cisis ZFC, luego HK es consistente con ZFC.

En lugar de tratar de deducir “filosóficamente” las propiedades de los conjuntos de una definición “filosófica” de conjunto, lo que hace ZFC es presentar explícitamente unos axiomas que describen lo que podemos afirmar a priori sobre tales “conjuntos”. Aunque sería fácil considerar una teoría que distinguiera entre “conjuntos” y objetos que, pudiendo ser elementos de los conjuntos, no son ellos mismos conjuntos, lo cierto es que esa distinción sólo complicaría las formas sin aportar realmente más potencia a la teoría, así que ZFC adopta el convenio contrario: todos los objetos de los que se puede hablar en ZFC son conjuntos.

Existen muchos conceptos de los que podemos hablar independientemente de cualquier teoría de conjuntos, como son los números naturales, los conceptos geométricos de punto, recta, plano, etc., pero para “insertarlos” en ZFC necesitamos adoptar alguna clase de convenio que nos permita identificarlos con algunos conjuntos. En el caso de los números naturales, la forma usual de hacerlo es convenir en que $0 = \emptyset$, $1 = \{0\}$, $2 = \{0, 1\}$, etc., aunque cuando consideramos los números naturales como parte de los números enteros, racionales o reales, cambiamos esta identificación por otras más complejas.

Ahora bien, bajo el supuesto de que, en efecto, ZFC es consistente y, por consiguiente (en virtud del teorema de completitud de Gödel), existen unos objetos que satisfacen los axiomas de ZFC, sucede que no existe una única forma de interpretar dichos axiomas, sino que existen, de hecho, infinitas formas de interpretar las palabras “conjunto” y “pertenencia” (los únicos conceptos que en ZFC no se definen a partir de otros más elementales) de modo que se cumplan en cualquier caso los axiomas de ZFC, pero de modo que haya afirmaciones que resultan ser verdaderas con unas interpretaciones posibles y falsas con otras.

Ésta es la razón de fondo por la cual ciertas afirmaciones como la hipótesis del continuo, el diamante de Jensen, la existencia de árboles de Kurepa, etc. no son demostrables ni refutables a partir de los axiomas de ZFC, porque hay posibles interpretaciones de las palabras “conjunto” y “pertenencia” respecto a las cuales estas afirmaciones son verdaderas y otras respecto a las cuales son falsas, pero en todas ellas son verdaderos los axiomas de ZFC, por lo que el hecho de que se cumplan dichos axiomas no implica que se cumplan necesariamente, ni tampoco que no se cumplan, tales afirmaciones.

Quizá el lector se pregunte cómo podemos afirmar que existen distintas interpretaciones de los axiomas de ZFC no equivalentes entre sí cuando acabamos de decir que es imposible justificar que exista al menos una. La respuesta es la siguiente: si admitimos que ZFC es consistente, es decir, que existen unos objetos (con una relación de pertenencia definida entre ellos) que cumplen los axiomas de la teoría de conjuntos y que, por tanto, podemos referirnos a ellos coherentemente como “la totalidad de los conjuntos”, es posible definir clases de conjuntos M con la propiedad de que si decidíramos llamar “conjuntos” exclusivamente a los elementos de M , prescindiendo de los conjuntos que quedan fuera, como si no existieran, los axiomas de la teoría de conjuntos siguen siendo válidos, de modo que un matemático que sólo “viera” los conjuntos de M no notaría la falta del resto.

Por ejemplo, puesto que un axioma de ZFC afirma que, para cada par de conjuntos x, y , debe existir el conjunto $\{x, y\}$, una clase M en las condiciones que estamos describiendo deberá cumplir que para cada par de conjuntos $x, y \in M$, se cumple que $\{x, y\} \in M$. Así, alguien que sólo “sea capaz de ver” los conjuntos de M no “verá” ninguna violación del axioma del par, y lo mismo debe aplicarse a todos y cada uno de los axiomas de ZFC.

La cuestión es que, partiendo de una noción indeterminada de “conjunto” sin suponer más que el hecho de que con ella se cumplen los axiomas de ZFC, es posible definir adecuadamente clases M en estas condiciones (lo que se llaman modelos de ZFC) de manera que al restringir el concepto de “conjunto” a los elementos de M , no sólo se sigan cumpliendo los axiomas de ZFC, sino que además se cumplan afirmaciones como la hipótesis del continuo o su negación. Cada vez que encontramos dos clases M y M' que sean modelos de ZFC en el sentido indicado y de modo que, al llamar “conjuntos” únicamente a los elementos de M sea verdadera una sentencia ϕ , mientras que al llamar “conjuntos” únicamente a los elementos de M' pase a ser verdadera $\neg\phi$, podemos concluir que ϕ no es demostrable ni refutable a partir de los axiomas de ZFC, ya que el hecho de que unos objetos cumplan los axiomas de ZFC no obliga ni a que se cumpla ϕ ni a que se cumpla $\neg\phi$.

En este libro definiremos con precisión el concepto de “modelo de ZFC” que acabamos de esbozar y a partir de ahí desarrollaremos técnicas para construir modelos que justifiquen la consistencia de muchas afirmaciones indemostrables en ZFC (siempre bajo el supuesto de que ZFC es consistente, porque si fuera contradictorio todo sería demostrable a partir de sus axiomas).

Para seguir este libro el lector deberá estar familiarizado con el contenido de mi libro de *Teoría de conjuntos* (en lo sucesivo [TC]) y con algunos aspectos concretos de mi libro de *Lógica matemática* (en lo sucesivo [LM]). Un lector familiarizado con [TC] pero no con [LM] debería asimilar al menos el Capítulo I sobre lenguajes formales y, sobre todo, estudiar la axiomática de ZFC hasta el punto en que vea evidente que todos los resultados demostrados en [TC] a partir de los axiomas de NBG son demostrables (con los mismos argumentos, una vez establecidos con técnicas distintas los hechos más básicos) en ZFC. En particular esto supone familiarizarse con el uso informal de clases propias en ZFC. Para ello el lector puede revisar las secciones 3.2, 3.3 y 10.3 de [LM].

Dedicaremos el capítulo I a discutir los principales conceptos y resultados que vamos a necesitar de [LM], con el fin de que un lector no familiarizado en profundidad con [LM] pueda seguir igualmente este libro.

Capítulo I

Preliminares

Para demostrar que algo no se puede demostrar son necesarios algunos conceptos y resultados de lógica matemática que van más allá del saber razonar competentemente en teoría de conjuntos (cosa que puede hacerse incluso sin ningún conocimiento específico de lógica formal). Todos estos requisitos están tratados sobradamente en [LM], pero aquí destacaremos los que realmente serán necesarios, de modo que un lector no familiarizado con [LM] pueda seguir este libro sin más que recurrir a [LM] para algunas demostraciones aisladas. El lector familiarizado con [LM] puede saltarse este capítulo o, a lo sumo, leerlo rápidamente para refrescar en su memoria los hechos que vamos a necesitar después. (Al menos debería leer la nota inicial de la página 5.)

En primer lugar, el lector deberá estar familiarizado con el hecho de que la teoría axiomática de conjuntos se “materializa” a través de un lenguaje formal (metamatemático) que llamaremos \mathcal{L}_{tc} , y debe conocer las definiciones y propiedades básicas de dichos lenguajes (términos, fórmulas, variables libres, etc.) Para los resultados generales sobre lenguajes formales remitimos al capítulo I de [LM] (el lenguaje \mathcal{L}_{tc} se introduce en [LM 3.8]).

En segundo lugar, el lector debe tener asimilado que todos los teoremas que los matemáticos aceptan como “demostrados” sin para la que no tienen argumento alguno que la justifique objetivamente, como pueda ser la hipótesis del continuo o el diamante de Jensen, pueden demostrarse en ZFC, que es la teoría que resulta de añadir el axioma de elección a la teoría de *Zermelo-Fraenkel* ZF cuyos axiomas son indicados en la página siguiente.

Los cuatro primeros axiomas determinan la teoría que llamamos ZF* y es equivalente a la teoría NBG* descrita tanto en [LM] como en [TC]. El lector debe comprender en qué consiste dicha equivalencia. En términos rigurosos está enunciada y demostrada en [LM 10.19], pero no es necesario que el lector asimile esa demostración. Basta con que comprenda que la diferencia esencial entre NBG* y ZF* es que en la primera los “objetos de estudio” reciben el nombre de “clases”, y de entre ellas se definen los “conjuntos”, mientras que en ZF* sólo tenemos el concepto (indefinido) de “conjunto”, que se corresponde con el concepto de

La teoría de conjuntos ZF

Extensionalidad	$\Lambda xy(\Lambda u(u \in x \leftrightarrow u \in y) \rightarrow x = y)$
Par	$\Lambda xy\Lambda z\Lambda u(u \in z \leftrightarrow u = x \vee u = y)$
Unión	$\Lambda x\Lambda y\Lambda u(u \in y \leftrightarrow \Lambda v(u \in v \wedge v \in x))$
Reemplazo	$\Lambda xyz(\phi(x, y) \wedge \phi(x, z) \rightarrow y = z)$ $\rightarrow \Lambda a\Lambda b\Lambda y(y \in b \leftrightarrow \Lambda x(x \in a \wedge \phi(x, y)))$ (*)
Infinitud	$\Lambda x(\emptyset \in x \wedge \Lambda u(u \in x \wedge u' \in x))$
Partes	$\Lambda x\Lambda y\Lambda u(u \subset x \rightarrow u \in y)$
Regularidad	$\Lambda x(x \neq \emptyset \rightarrow \Lambda u(u \in x \wedge u \cap x = \emptyset))$

(*) para toda fórmula $\phi(x, y)$, tal vez con más variables libres, distintas de b .

“conjunto” de ZF*. Los axiomas de ZF* permiten probar exactamente las mismas propiedades sobre los conjuntos que los axiomas de NBG*, pero, en principio, no permiten, no ya demostrar, sino siquiera enunciar ninguna propiedad sobre clases. Ahora bien, lo cierto es que en NBG* también puede hablarse de clases, informal, pero rigurosamente, en el sentido que se discute en¹ [LM 3.2.2]. La idea es que las clases en ZF* deben entenderse esencialmente como fórmulas metamatemáticas, de modo que la clase determinada por una fórmula $\phi(x)$ es la colección de todos los conjuntos que cumplen $\phi(x)$, aunque no exista ningún conjunto cuyos elementos sean dichos conjuntos.

En la práctica, el lector puede constatar que todos los hechos básicos sobre clases y conjuntos que se demuestran a partir de los axiomas de NBG* pueden probarse (alterando a veces ligeramente los argumentos y la forma de concebir los que hagan referencia a clases propias) a partir de los axiomas de ZF*, y viceversa. Alternativamente, si el lector está dispuesto a aceptar sin pararse en detalles que los razonamientos conjuntistas básicos son formalizables en NBG* (como se muestra en [TC]), puede aceptar al mismo precio que ZF* cumple la misma función, y no necesitará más detalles al respecto para seguir este libro. En cuanto a los axiomas restantes de NBG y ZFC son exactamente los mismos para ambas teorías y están discutidos con detalle tanto en [LM, Capítulo XI] (incidiendo más en cuestiones lógicas) como en [TC] (principalmente en el Capítulo III, incidiendo más en cuestiones propiamente conjuntistas). En definitiva sucede que, una vez deducidas (por caminos diferentes) las propiedades básicas de las clases y los conjuntos a partir de los axiomas básicos de ZF* o NBG*, toda demostración en ZFC puede ser considerada literalmente, sin cambio alguno, como una demostración en NBG, y viceversa.

¹En [LM 3.2.2] se explica el concepto de clase en una subteoría muy débil de ZF*, la que llamamos teoría básica de conjuntos B. Dicha teoría basta para definir el concepto de ordinal y poco más, pero tiene el interés de que es una subteoría de todas las teorías que nos van a interesar. No es necesario que el lector se preocupe de determinar qué teoremas exactamente son demostrables en B y cuáles no.

1.1 La jerarquía de Lévy I

Las fórmulas del lenguaje \mathcal{L}_{tc} pueden clasificarse en una jerarquía según su complejidad. La base de esta jerarquía la constituyen las fórmulas de tipo Δ_0 , que son las fórmulas sin descriptores en las que todos los cuantificadores aparecen en la forma $\bigwedge x \in y$ o bien $\bigvee x \in y$.

Una fórmula es de tipo Σ_n (con $n \geq 1$) si es de la forma $\bigvee x_1 \bigwedge x_2 \cdots \alpha$, donde hay n cuantificadores alternados (empezando por un particularizador) y α es de tipo Δ_0 . En cambio, una fórmula es de tipo Π_n si es de la forma $\bigwedge x_1 \bigvee x_2 \cdots \alpha$, en las mismas condiciones salvo que el primer cuantificador es un generalizador.

Más en general, una fórmula ϕ (tal vez con descriptores) es Δ_0 , Σ_n o Π_n respecto de una teoría T (sobre el lenguaje \mathcal{L}_{tc}) si es equivalente en T a una fórmula Δ_0 , Σ_n o Π_n , respectivamente, en sentido estricto. Diremos que una fórmula es Δ_n (para $n \geq 1$) respecto de una teoría T si es equivalente en T a una fórmula Σ_n y a una fórmula Π_n .

Diremos también que un término t es Σ_n , Π_n o Δ_n si y sólo si lo es la fórmula $y = t$, donde y es cualquier variable que no esté en t .

Recordamos las propiedades elementales de esta jerarquía, que son válidas respecto de cualquier teoría T que extienda a la teoría básica de conjuntos B.

- Las clases de fórmulas de la jerarquía de Lévy satisfacen las inclusiones siguientes (véanse las observaciones posteriores a [LM 6.1]):

$$\begin{array}{ccccccc} & \cup^{\Sigma_1} & \cap^{\Sigma_2} & \cup^{\Sigma_3} & \cap^{\Sigma_4} & \cup \cdots \\ \Delta_0 \subset \Delta_1 & \cap^{\Delta_2} & \cap^{\Delta_3} & \cap^{\Delta_4} & \cap \cdots & & \\ & \cap^{\Pi_1} & \cup^{\Pi_2} & \cap^{\Pi_3} & \cup \cdots & & \end{array}$$

- Si α y β son Σ_n (resp. Π_n), también lo son $\alpha \wedge \beta$ y $\alpha \vee \beta$.
- Si α es Π (resp. Σ_n) y β es Σ_n (resp. Π_n) entonces $\alpha \rightarrow \beta$ es Σ_n (resp. Π_n).
- α es Σ_n si y sólo si $\neg\alpha$ es Π_n , y viceversa.
- Si α es Σ_n , también lo es $\bigvee x \alpha$.
- Si α es Π_n , también lo es $\bigwedge x \alpha$.

Para ZF podemos probar una propiedad adicional:

- Si α es Σ_n o Π_n (respecto a ZF), también lo son $\bigwedge x \in y \alpha$ y $\bigvee x \in y \alpha$.

En efecto, razonamos por inducción sobre n (entendiendo que Σ_0 y Π_0 es lo mismo que Δ_0). Para $n = 0$ es trivial. Si es cierto para n y tenemos que α es Σ_{n+1} , entonces α es equivalente a $\bigvee u \beta$, para cierta β de clase Π_n , y $\bigwedge x \in y \alpha$ es equivalente a $\bigwedge x \in y \bigvee u \beta$.

Si suponemos esto, para cada $x \in y$ podemos considerar el mínimo ordinal δ_x tal que $\bigvee u \in V_{\delta_x} \beta$, y a su vez definir $\gamma = \bigcup_{x \in y} \delta_x$. Así $\bigwedge x \in y \bigvee u \in V_\gamma \beta$, o también

$$\bigvee a \bigwedge x \in y \bigvee u \in a \beta.$$

De este modo hemos probado una implicación de

$$\bigwedge x \in y \bigvee u \beta \leftrightarrow \bigvee a \bigwedge x \in y \bigvee u \in a \beta,$$

y la otra es trivial. Por hipótesis de inducción la fórmula de la derecha es Σ_{n+1} .

Ahora, si α es Π_{n+1} , entonces $\neg\alpha$ es Σ_{n+1} , luego por la parte ya probada $\bigwedge x \in y \neg\alpha$ es también Σ_{n+1} , luego $\bigvee x \in y \alpha$ es Π_{n+1} . ■

En realidad nos van a interesar casi exclusivamente los niveles más bajos de la jerarquía de Lévy, es decir, las fórmulas Δ_0 , Δ_1 , Σ_1 y Π_1 respecto de determinadas teorías T, y veremos que la mayor parte de los conceptos matemáticos básicos se expresan mediante términos y fórmulas de alguna de estas categorías. Aquí debemos señalar una dificultad, y es que algunos resultados fundamentales requieren establecer que estos conceptos básicos a los que nos referimos son, de hecho, Δ_0 , o Δ_1 , etc. respecto a teorías más débiles que ZF. La mayor parte de los resultados expuestos en este libro puede seguirse sin lagunas lógicas observando que la clasificación de los conceptos conjuntistas básicos respecto de la jerarquía de Lévy puede llevarse a cabo en la teoría ZF–AP (es decir, sin el axioma de partes), pero hay otra teoría alternativa que, a la larga, es mucho más conveniente, por lo que el lector puede meditar si le interesa familiarizarse con ella o no a la hora de seguir los primeros capítulos de este libro. Pasamos a describirla brevemente antes de explorar la jerarquía de Lévy.

1.2 La teoría de conjuntos de Kripke-Platek

La teoría de *Kripke-Platek* (KP) es la teoría sobre el lenguaje \mathcal{L}_{tc} cuyos axiomas son los siguientes:

Extensionalidad	$\bigwedge xy (\bigwedge u (u \in x \leftrightarrow u \in y) \rightarrow x = y)$
Par	$\bigwedge xy \bigvee z (x \in z \wedge y \in z)$
Unión	$\bigwedge x \bigvee y \bigwedge u \in x \bigwedge v \in u v \in y$
Δ_0-especificación	$\bigwedge x \bigvee y \bigwedge u (u \in y \leftrightarrow (u \in x \wedge \phi(u))) \quad (*)$
Δ_0-recolección	$\bigwedge u \bigvee v \phi(u, v) \rightarrow \bigwedge a \bigvee b \bigwedge u \in a \bigvee v \in b \phi(u, v) \quad (**)$
Regularidad	$\bigvee u \phi(u) \rightarrow \bigvee u (\phi(u) \wedge \bigwedge v \in u \neg\phi(v)) \quad (***)$

(*) Para toda fórmula ϕ (tal vez con más variables libres) de tipo Δ_0 ,

(**) Para toda fórmula ϕ (tal vez con más variables libres).

Nota En [LM] definimos KP restringiendo el esquema de regularidad a fórmulas de tipo Π_1 . Ello se debe a que, con dicha restricción, KP está estrechamente relacionada con un importante fragmento de la aritmética de Peano, pero en el contexto de la teoría de conjuntos es más razonable incluir en KP el esquema de regularidad para fórmulas arbitrarias, como acabamos de hacer. El lector familiarizado con [LM] deberá tener en cuenta esta diferencia. ■

Llamaremos KPI a KP + AI (la teoría que resulta de añadir a KP el axioma de infinitud de ZF).²

Es fácil ver [LM 12.3] que todos los axiomas de KPI excepto el de Δ_0 -recolección son demostrables en ZF–AP. De hecho, en ZF–AP se demuestra el esquema de especificación para fórmulas cualesquiera, y en ZF se demuestra el esquema de recolección para fórmulas cualesquiera. En efecto, bajo el supuesto $\bigwedge u \bigvee v \phi(u, v)$ y fijado un conjunto a , a cada $u \in a$ podemos asignarle el mínimo ordinal α tal que $\bigvee v \in V_\alpha \phi(u, v)$. Tenemos así una aplicación $f : a \longrightarrow \Omega$ y $b = \bigcup_{\alpha \in f[A]} V_\alpha$ cumple $\bigwedge u \in a \bigvee v \in b \phi(u, v)$.

Así pues, KPI es una subteoría de ZF, pero ni KPI es una subteoría de ZF–AP ni viceversa.

Hay dos resultados que hacen a KP especialmente conveniente para tratar con la jerarquía de Lévy (puestos a tener que renunciar a AP). Uno es [LM 6.3], que afirma que si α es una fórmula Σ_1 o Π_1 (respecto de KP) también lo son $\bigwedge x \in y \alpha$ y $\bigvee x \in y \alpha$. El segundo es [LM 12.7], que afirma que toda función $F : D \longrightarrow V$ definida sobre una clase Δ_1 por recurrencia sobre una función Σ_1 es también Σ_1 .

Enseguida veremos que ambos resultados son muy útiles para ubicar conceptos conjuntistas en la jerarquía de Lévy, y hay que tener presente que no son válidos en ZF–AP, pese a lo cual, en muchos casos es posible llegar a los mismos resultados en esta teoría. A este respecto, el lector tiene varias posibilidades:

- a) Estudiar la teoría KP, por ejemplo en [LM, Secciones 6.2, 6.4, 6.5].
- b) Centrarse en los argumentos que veremos para ZF–AP sin tener en cuenta los aplicables a KP. (Esto sólo le impedirá seguir algunos resultados más avanzados.)
- c) Seguir los razonamientos que veremos para KP pero sustituyendo KP por ZF–AP+ Δ_0 -sustitución, pues esta teoría extiende a KPI y en ella es fácil probar los dos resultados que citábamos anteriormente sobre la jerarquía de Lévy.

El lector familiarizado con [TC] no debería tener problemas en trabajar en ZF–AP, pues en los tres primeros capítulos se trabaja casi siempre sin AP. Añadir el principio de Δ_0 -recolección sólo significará para nosotros contar también con los dos teoremas indicados más arriba.

²El lector deberá tener presente que algunos autores llaman KP a la teoría que nosotros llamamos KPI, es decir, incluyen el axioma de infinitud entre los axiomas de KP.

1.3 La jerarquía de Lévy II

Dedicamos esta sección a mostrar algunos ejemplos relevantes de clasificación de conceptos conjuntistas en la jerarquía de Lévy respecto de subteorías adecuadas de ZF.

Conceptos Δ_0 En [LM B.3] se muestra una lista de conceptos conjuntistas básicos que son Δ_0 respecto a la teoría básica de conjuntos B o extensiones adecuadas, como ZF* o KP.

Desarrollar una fórmula hasta hacer explícito que todos los cuantificadores que involucra están acotados es una labor tediosa, por lo que en la práctica el lector debería habituarse a reconocer las fórmulas Δ_0 sin necesidad de ello. La idea básica es que una fórmula es Δ_0 si para verificarla sólo es necesario considerar la relación de pertenencia o la igualdad sobre los conjuntos que involucra, o sobre sus elementos, o sobre los elementos de sus elementos, etc.

Por ejemplo, la fórmula $z = \{x, y\}$ es Δ_0 , pues para verificarla sólo debemos considerar x, y y todos los elementos de z . Concretamente:

$$z = \{x, y\} \leftrightarrow x \in z \wedge y \in z \wedge \bigwedge u \in z (u = x \vee u = y).$$

Lo mismo vale para $z = (x, y)$, pues ahora sólo son relevantes x, y , los elementos de z y los elementos de los elementos de z . En efecto:

$$z = (x, y) \leftrightarrow \bigvee uv \in z (u = \{x, x\} \wedge v = \{x, y\}),$$

y ahora basta usar que las fórmulas $u = \{x, y\}$ y $v = \{x, y\}$ son Δ_0 .

Similarmente $y = \mathcal{D}x$ es Δ_0 , pues en principio

$$y = \mathcal{D}x \leftrightarrow \bigwedge u \in y \bigvee v(u, v) \in x \wedge \bigwedge rs((r, s) \in x \rightarrow r \in y).$$

pero vemos que v es un elemento de un elemento de un elemento de x , luego podemos acotar la variable v mediante

$$\bigwedge u \in y \bigvee v(u, v) \in x \leftrightarrow \bigwedge u \in y \bigvee w \in x \bigvee q \in w \bigvee v \in q w = (u, v),$$

donde $q = \{u, v\}$. En la práctica uno puede “prever” que no habrá problemas en acotar la variable v si uno se pone a ello porque v es un elemento de un elemento de un elemento de x (ni siquiera es necesario precisar cuántas veces hay que repetir la palabra “elemento” exactamente). Por el mismo motivo es “previsible” que las variables r y s son acotables, pues son necesariamente elementos de elementos... de elementos de x (las veces que haga falta).

Aunque, en caso de duda, explicitar las acotaciones es la forma inequívoca de determinar si en efecto una fórmula es Δ_0 , lo cierto es que desarrollar cuantificadores como acabamos de ver es una tarea rutinaria que no ofrece ninguna dificultad, siempre y cuando tengamos claro que la variable en cuestión sólo puede representar a un elemento de un elemento, etc., de uno de los conjuntos que intervienen en la fórmula en cuestión.

Comparemos con el caso de la fórmula

$$(A, R) \text{ es un conjunto bien ordenado} \leftrightarrow (A, R) \text{ es un conjunto ordenado} \wedge$$

$$\wedge X(X \subset A \wedge X \neq \emptyset \rightarrow \forall m \in X \wedge a \in A \ mRa).$$

Es claro que (A, R) es un conjunto ordenado es una fórmula Δ_0 , sin necesidad de explicitar más la fórmula, porque es claro que verificar que es así sólo requiere analizar lo que les sucede a los elementos de A y a los de \leq . Si nos ponemos a explicitarlo, nunca tendremos problemas para encontrar conjuntos que acoten las variables que usemos. Por ejemplo, la propiedad reflexiva es

$$\wedge a \in A \vee w \in R \ w = (a, a).$$

En cambio, no es menos evidente que el cuantificador $\wedge X$ no puede ser acotado, pues X debe recorrer los subconjuntos de X , y éstos no son necesariamente elementos de A ni de R , ni elementos de sus elementos, etc. Por ello no podemos concluir que “ser un conjunto bien ordenado” sea una propiedad Δ_0 , sino tan sólo Π_1 (enseguida veremos que, en teorías razonables, es Δ_1).

Así pues, para determinar la situación de una fórmula en la jerarquía de Lévy lo único importante es identificar las variables “no acotables” que aparecen en ella, y en la práctica esto no se hace desarrollando los cuantificadores, sino planteándose, para cada variable, si la fórmula permite únicamente que recorra elementos de elementos (etc.) de parámetros o puede variar sobre conjuntos más generales.

En la práctica el lector debería usar los ejemplos de [LM B.3] para entrenarse acotando variables hasta que se convenza de que sabe hacerlo mecánicamente y, por consiguiente, esté dispuesto a ahorrarse en la práctica lo que no es más que una comprobación tediosa previsible.

Una fórmula delicada es “ α es un ordinal” (o, más brevemente, $\alpha \in \Omega$). En [TC] la definimos (en el contexto de NBG* o, equivalentemente, de ZF*) como “ α es transitivo, \in -conexo y bien fundado”, y las dos primeras propiedades son trivialmente Δ_0 , pero la tercera no lo es. En efecto, la buena fundación es

$$\wedge x \subset \alpha(x \neq \emptyset \rightarrow \forall u \in x \ u \cap x = \emptyset),$$

y la variable x no es “acotable”, porque los subconjuntos de α no son necesariamente elementos, ni elementos de elementos de α , etc. Se trata de una propiedad Π_1 y no necesariamente Δ_0 .

Ahora bien, el axioma de regularidad afirma precisamente que todo conjunto está bien fundado, luego en toda extensión de B que contenga dicho axioma la fórmula $\alpha \in \Omega$ resulta ser Δ_0 (pues es equivalente a “ α es transitivo y \in -conexo”). Esto vale en particular para KP, ZF–AP, etc.

Como se explica en [LM B.3], en cualquier extensión de B en la que “ser un ordinal” sea Δ_0 lo son también las fórmulas “ser un ordinal sucesor”, “ser un ordinal límite”, “ser un número natural” y, si además contamos con el axioma de infinitud, también es Δ_0 el término³ ω . Las comprobaciones son inmediatas.

³No es lo mismo que $n \in \omega$ sea Δ_0 que que lo sea el término ω , es decir, la fórmula $x = \omega$.

Conceptos Δ_1 Un ejemplo de término Δ_1 tanto en KP como en ZF–AP es $\text{rang } x$ (el rango de un conjunto respecto de la relación de pertenencia). En KP es consecuencia inmediata de [LM 12.7], pero podemos dar un argumento general válido también en ZF–AP:

$$\begin{aligned} y = \text{rang } x \leftrightarrow \bigvee z f(\bigcup z \subset z \wedge x \in z \wedge f : z \longrightarrow \omega \wedge y = f(z) \wedge \\ \bigwedge u \in x f(u) = \bigcup_{v \in u} f(v) + 1. \end{aligned}$$

(Notemos que $\bigcup z \subset z$ es una forma de indicar que z es transitivo.) Esta fórmula es claramente Σ_1 (pues la fórmula tras $\bigvee z f$ sólo involucra elementos de x, y, z, f , y elementos de sus elementos, etc.), luego $\text{rang } x$ es Σ_1 y, consecuentemente,⁴ también Δ_1 .

En [LM B.3] se prueba que en KPI son Δ_1 los términos $x^{<\omega}$ y $\mathcal{P}^f x$ correspondientes, respectivamente, al conjunto de sucesiones finitas o de subconjuntos finitos de un conjunto x , pero es claro que las equivalencias con fórmulas Σ_1 mostradas allí son válidas igualmente en KP–AI.

El teorema [LM 12.7] implica inmediatamente que las operaciones ordinales $\alpha + \beta$, $\alpha\beta$ y α^β son Δ_1 en KP. Por ejemplo, la suma $F : \Omega \times \Omega \longrightarrow \Omega$ se define mediante

$$F(\alpha, \beta) = G(\alpha, \beta, F(\alpha, -)|_\beta),$$

donde G es la función Σ_1 dada por:

$$\begin{aligned} G(\alpha, \beta, f) = \gamma \leftrightarrow (\beta = 0 \wedge \gamma = \alpha) \vee \bigvee \delta \in \beta (\beta = \delta \cup \{\delta\} \wedge \gamma = f(\delta) \cup \{f(\delta)\}) \\ \vee (\beta \text{ límite} \wedge \gamma = \bigcup f[\beta]), \end{aligned}$$

y para el producto y la exponenciación tenemos expresiones similares (usando, respectivamente, que la suma y el producto son Δ_1).

Un argumento alternativo válido en ZF–AP es el siguiente, por ejemplo para el producto de ordinales:

$$\begin{aligned} \gamma = \alpha \cdot \beta \leftrightarrow ((\alpha \notin \Omega \vee \beta \notin \Omega) \wedge \gamma = 0) \vee \alpha \in \Omega \wedge \beta \in \Omega \wedge \gamma \in \Omega \wedge \\ \bigvee f x (x = \alpha \times \beta \wedge f : x \longrightarrow \gamma \text{ semejanza}), \end{aligned}$$

donde la semejanza ha de entenderse respecto del buen orden lexicográfico en x . Es fácil ver que la fórmula tras $\bigvee f x$ es Δ_0 . Un argumento similar vale para la suma. El caso de la exponenciación es más complicado, pero no lo vamos a necesitar.

El teorema siguiente no es válido en KP.

⁴Esto es un argumento general: todo término Σ_1 es Δ_1 , porque

$$y = t \leftrightarrow \bigwedge x (x = t \rightarrow y = x),$$

luego también es Π_1 .

Teorema 1.1 Las fórmulas “ R es un buen orden en A ” y “ R es una relación bien fundada en A ” son Δ_1 respecto a ZF–AP, al igual que lo es el término $\text{ord}(A, R)$.

DEMOSTRACIÓN: En principio “ R es un buen orden en A ” es una fórmula Π_1 , pues equivale a

$$R \text{ es un orden parcial en } A \wedge \bigwedge X(X \subset A \wedge X \neq \emptyset \rightarrow \bigvee u \in X \bigwedge v \in X u R v),$$

pero, por otra parte, también equivale a⁵

$$R \text{ es un orden parcial en } A \wedge \bigvee f \alpha (\alpha \in \Omega \wedge f : \alpha \longrightarrow (A, R) \text{ semejanza}),$$

que es una fórmula Σ_1 (pues es fácil ver que “ser una semejanza” es Δ_0).

Lo mismo vale para “ R es una relación bien fundada en A ”, que por definición es Π_1 , pues equivale a

$$R \subset A \times A \wedge \bigwedge X(X \subset A \wedge X \neq \emptyset \rightarrow \bigvee u \in X \bigwedge v \in X \neg v R u)$$

y por otra parte, teniendo en cuenta que toda relación bien fundada permite construir una aplicación rango, equivale a la fórmula Σ_1 siguiente:

$$R \subset A \times A \wedge \bigvee f \alpha (\alpha \in \Omega \wedge f : A \longrightarrow \alpha \wedge \bigwedge uv \in A (u R v \rightarrow f(u) \in f(v))).$$

Por último, $\alpha = \text{ord}(A, R)$ equivale a

$$(R \text{ es un buen orden en } A \wedge \alpha \in \Omega \wedge \bigvee f f : \alpha \longrightarrow (A, R) \text{ semejanza}) \vee$$

$$(R \text{ no es un buen orden en } A \wedge \alpha = 0),$$

luego se trata de una fórmula Σ_1 , pero trivialmente equivale a

$$\bigwedge \beta (\beta = \text{ord}(A, R) \rightarrow \beta = \alpha),$$

luego también es Π_1 . ■

El sistema numérico en ZF Terminamos la sección analizando las definiciones de los conjuntos numéricos:

Teorema 1.2 Las fórmulas $x \in \mathbb{Z}$, $x \in \mathbb{Q}$ y $x \in \mathbb{R}$ son Δ_1 respecto de ZF, al igual que los términos \mathbb{Z} y \mathbb{Q} .

DEMOSTRACIÓN: Se trata de una simple comprobación rutinaria a partir de las definiciones correspondientes (véase [TC, capítulo VII]). Por ejemplo:

$$\begin{aligned} x \in \mathbb{Z} &\leftrightarrow \bigvee mn \in \omega (\bigwedge rs \in \omega (r + m = s + n \rightarrow (r, s) \in x) \\ &\quad \wedge \bigwedge u \in x (\bigvee rs \in \omega (u = (r, s) \wedge r + m = s + n))). \end{aligned}$$

⁵ Esta equivalencia no es válida en KPI, porque en esta teoría no puede probarse que todo conjunto bien ordenado es semejante a un ordinal.

De este modo, $x \in \mathbb{Z} \leftrightarrow \phi(x, \omega)$, donde $\phi(x, w)$ es Δ_1 , y entonces

$$x \in \mathbb{Z} \leftrightarrow \bigvee w (w = \omega \wedge \phi(x, w)) \leftrightarrow \bigwedge w (w = \omega \rightarrow \phi(x, w)),$$

luego $x \in \mathbb{Z}$ es Δ_1 (donde usamos que $w = \omega$ es Δ_0).

También son Δ_1 los términos $x + y$, $x \cdot y$ correspondientes a la suma y el producto de números enteros. En efecto,

$$\begin{aligned} z = x + y &\leftrightarrow (x \in \mathbb{Z} \wedge y \in \mathbb{Z} \wedge \\ &\bigvee m_1 n_1 m_2 n_2 m_3 n_3 \in \omega ((m_1, n_1) \in x \wedge (m_2, n_2) \in y \wedge (m_3, n_3) \in z \\ &\wedge m_3 = m_1 + m_2 \wedge n_3 = n_1 + n_2)) \vee ((x \notin \mathbb{Z} \vee y \notin \mathbb{Z}) \wedge z = \emptyset), \end{aligned}$$

de modo que $z = x + y \leftrightarrow \phi(z, x, y, \omega)$, con ϕ de tipo Δ_0 y concluimos como antes. El caso del producto es análogo.

También es Δ_1 la fórmula $x \leq y$ correspondiente a la relación de orden en \mathbb{Z} , pues equivale a

$$\bigvee m_1 m_2 m n \in \omega ((m_1, n) \in x \wedge (m_2, n) \in y \wedge m_1 + m = m_2).$$

(Aquí usamos que $x \leq y$ si y sólo si $y = x + z$, con $z \geq 0$, con lo que $z = [m, 0]$.)

Ahora probamos que $y = \mathbb{Z}$ es Δ_1 . En efecto, es equivalente a

$$\bigwedge x \in y \quad x \in \mathbb{Z} \wedge \bigwedge m n \in \omega \bigvee x \in y \bigwedge r s \in \omega (m + r = n + s \rightarrow (r, s) \in x)$$

y eliminamos ω con el argumento anterior.

Ahora se prueba que $x \in \mathbb{Q}$ es Δ_1 , al igual que la suma, el producto y el orden de \mathbb{Q} , con argumentos análogos en los que usamos \mathbb{Z} en lugar de ω (y las operaciones en \mathbb{Z} en lugar de las de ω).

Si consideramos a \mathbb{R} definido mediante secciones iniciales de \mathbb{Q} , entonces

$$\begin{aligned} x \in \mathbb{R} &\leftrightarrow x \subset \mathbb{Q} \wedge x \neq \emptyset \wedge x \neq \mathbb{Q} \wedge \bigwedge u \in \mathbb{Q} \bigwedge v \in x (u < v \rightarrow u \in x) \\ &\wedge \bigwedge u \in x \bigvee v \in x (u < v), \end{aligned}$$

de modo que $x \in \mathbb{R} \leftrightarrow \phi(x, \mathbb{Q})$, donde $\phi(x, q)$ es Δ_1 , y la \mathbb{Q} se elimina del modo usual. La relación de orden en \mathbb{R} es trivialmente Δ_0 , pues es la inclusión. También son Δ_1 los términos $x+y$ y xy correspondientes a la suma y el producto de números reales, pues, por ejemplo, teniendo en cuenta que $z = x + y$ es el único número real que cumple $p + q < z$, para todo par de números racionales $p < x$, $q < y$, y a la vez $z \leq p + q$, para todo par de números racionales $x \leq p$, $y \leq q$, se cumple que

$$\begin{aligned} z = x + y &\leftrightarrow (x \in \mathbb{R} \wedge y \in \mathbb{R} \wedge z \in \mathbb{R} \wedge \bigwedge p q \in \mathbb{Q} (p \in x \wedge q \in y \rightarrow p + q \in z) \\ &\wedge \bigwedge p q \in \mathbb{Q} (p \notin x \wedge q \notin y \rightarrow p + q \notin z)) \vee ((x \notin \mathbb{R} \vee y \notin \mathbb{R}) \wedge z = \emptyset), \end{aligned}$$

con lo que $z = x + y \leftrightarrow \phi(x, y, z, \mathbb{Q})$, con $\phi(x, y, z, q)$ de tipo Δ_1 , y la \mathbb{Q} se elimina como es habitual.

La prueba para xy es algo más farragosa porque hay que distinguir casos según si los factores son positivos o negativos. ■

1.4 La formalización de la lógica

En el capítulo XI de [TC] se presenta la formalización en NBG (o, equivalente-
mente, en ZF) de los resultados básicos sobre lenguajes formales y modelos,
pero sin considerar el caso más delicado desde un punto de vista conceptual,
que es la formalización en ZF (o en cualquier subteoría suficientemente potente)
del lenguaje formal \mathcal{L}_{tc} y sus modelos. Al considerar este caso resulta crucial
no confundir las fórmulas metamatemáticas que usamos en los enunciados y las
demonstraciones con las fórmulas matemáticas definidas en la teoría considerada.

Según señalábamos en la introducción, ZF (o cualquiera de sus subteorías o extensiones) consiste en un lenguaje formal \mathcal{L}_{tc} y unos axiomas que enuncian propiedades de unos objetos no definidos a los que llamamos “conjuntos”, de modo que todas las afirmaciones demostrables en ZF tienen que ser entendidas como afirmaciones sobre conjuntos (o, a lo sumo, sobre clases, pero toda afirmación sobre clases puede reducirse a una afirmación sobre conjuntos). Podemos resumir esto diciendo que todos los objetos de los que se puede hablar en ZF son conjuntos.

Ahora bien, sin contradecir lo que acabamos de decir, hay que entender que al trabajar en ZF nos vemos en la necesidad de tratar con unos objetos que no podemos considerar como conjuntos, es decir, que no son ninguno de los objetos de los que hablamos mediante ZF. Se trata de los signos del lenguaje \mathcal{L}_{tc} y los términos y fórmulas construidos a partir de ellos.

Por ejemplo, un matemático puede decir que el número 7 es un conjunto, o que en el axioma

$$\wedge xy \vee z \wedge u(u \in z \leftrightarrow u = x \vee u = y).$$

las variables x , y , z , u hacen referencia a conjuntos, pero al mismo tiempo que podemos decir que, en este axioma, u es un conjunto arbitrario, también podemos decir que “ u ” no es un conjunto, sino una letra, un signo, una variable del lenguaje de la teoría de conjuntos, de modo que cuando escribimos $u \in x$ no queremos decir que “la letra u ” es un elemento del conjunto x , ni mucho menos de “la letra x ”, igual que podemos decir que Madrid es una ciudad, pero que “Madrid” no es una ciudad, sino una palabra. Esto es especialmente claro si en lugar de considerar la variable u consideramos el cuantificador \wedge . Ahora ni siquiera tendría sentido en modo alguno escribir algo como $\wedge \in \{\wedge\}$, mientras que sí lo tiene $7 \in \{7\}$.

Normalmente estas observaciones podrían considerarse triviales, ya que todo el mundo tiene clara la diferencia entre la “ x ” como mera letra y “el conjunto x ” del que tiene sentido hablar en el marco de ZF, pero aquí es necesario hacer hincapié en esto porque a este doble sentido en que podemos concebir cada signo del lenguaje de la teoría de conjuntos se une una tercera posibilidad, y es que, entre los objetos matemáticos que pueden definirse en ZF (números, espacios topológicos, etc.) figuran los lenguajes formales, y entre los lenguajes formales que podemos estudiar en ZF figura el lenguaje formal de ZF.

Si, por ejemplo, definimos el lenguaje \mathcal{L}_{tc} en ZF de modo que sus signos sean números naturales, podemos tener perfectamente que $\Lambda = 7$, y podemos afirmar que $\Lambda \in \text{Sig}(\mathcal{L}_{tc})$, o que $\Lambda \in \{\Lambda\}$, o que

$$\Lambda xy\forall z\Lambda u(u \in z \leftrightarrow u = x \vee u = y) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc}),$$

pero aquí es fundamental ser consciente de que estamos llamando Λ a dos cosas radicalmente distintas: una es el cuantificador universal metamatemático, que no podemos considerarlo como un conjunto, de modo que $\Lambda \in \{\Lambda\}$ es un sinsentido si entendemos Λ de este modo. La otra es el cuantificador universal definido en ZF (o en una subteoría adecuada), que es un conjunto, y podemos suponer que es, de hecho, un número natural. Para evitar ambigüedades podríamos usar ángulos de Quine, de modo que Λ es el cuantificador metamatemático y $\lceil \Lambda \rceil$ el matemático, e igualmente podríamos escribir

$$\lceil \Lambda xy\forall z\Lambda u(u \in z \leftrightarrow u = x \vee u = y) \rceil \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc}),$$

con lo que dejamos constancia de que toda la primera parte no es una fórmula metamatemática, sino un término metamatemático que representa a un cierto conjunto (una sucesión finita de números naturales). Sin embargo, en lugar de usar ángulos de Quine lo que haremos será evitar la escritura de expresiones ambiguas como la anterior, en la que se mezclan el relator (matemático) $\in \in \omega$ (es decir, $\lceil \in \rceil \in \omega$) con el relator metamatemático \in , que no es un conjunto, porque no es un objeto de los que podemos hablar desde ZFC, sino uno de los signos con los que enunciamos teoremas de ZFC.

Aunque la diferencia entre que, en un contexto dado, ϕ represente a una fórmula metamatemática o bien a una fórmula matemática tiene en sí misma una gran importancia conceptual, también tiene muchas consecuencias en la práctica, y de ahí que no podamos dejar de tenerla presente en ningún momento. Por ejemplo, si ϕ es una fórmula matemática, tiene perfecto sentido empezar un teorema con $\Lambda\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc}) \dots$, y “técticamente” ahí ϕ es una variable del lenguaje metamatemático \mathcal{L}_{tc} , una variable cuantificada con el cuantificador universal metamatemático. En cambio, en un contexto en el que ϕ sólo pueda entenderse como una fórmula metamatemática, sería un sinsentido escribir lo anterior.

En [LM, sección 8.1] se prueba que todas las fórmulas que definen los conceptos sintácticos de los lenguajes formales son Δ_1 en KP, como “ α es una fórmula de \mathcal{L}_{tc} ”, etc.

Si estamos dispuestos a trabajar en KPI (cosa que no nos supondrá ninguna restricción) las pruebas se simplifican bastante, pues podemos aplicar una técnica general que también vale en ZF–AP. Se trata de aislar (y, de hecho, explicitar) los parámetros necesarios para acotar las variables que no pueden acotarse en una fórmula mediante otras variables. Por ejemplo, para probar que $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$ es Δ_1 (tanto en KPI como en ZF–AP) basta probar que, en ambas teorías,

$$\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc}) \leftrightarrow \phi(\alpha, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}),$$

donde ϕ es Δ_0 . Diremos entonces que $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ es Δ_0 con parámetros ω , $\omega^{<\omega}$, $(\omega^{<\omega})^{<\omega}$. Esto implica inmediatamente que la fórmula es Δ_1 (sin parámetros), pues

$$\begin{aligned}\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) &\leftrightarrow \bigvee wcs(w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega} \wedge \phi(\alpha, w, c, s)) \\ &\leftrightarrow \bigwedge wcs(w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega} \rightarrow \phi(\alpha, w, c, s)),\end{aligned}$$

y, como la fórmula $w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega}$ es Δ_1 , concluimos que toda la fórmula también lo es.

Ahora bien, probar que la fórmula $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ es Δ_0 con parámetros ω , $\omega^{<\omega}$, $(\omega^{<\omega})^{<\omega}$ significa probar que es equivalente a una fórmula en la que las únicas variables que no pueden acotarse por otras variables, pueden acotarse por alguno de los parámetros indicados. Veamos que así es:

$$\begin{aligned}\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) &\leftrightarrow \bigvee f \in (\omega^{<\omega})^{<\omega} \bigvee mn \in \omega (\mathcal{D}f = m \wedge m = n + 1 \wedge f(n) = \alpha \\ &\quad \wedge \bigwedge i \in m \bigwedge \beta \in \omega^{<\omega} (\beta = f(i) \rightarrow \dots)),\end{aligned}$$

donde los puntos suspensivos establecen todas las posibilidades para que β sea una fórmula construida a partir de subfórmulas anteriores de la sucesión f , concretamente, se trata de la disyunción de las fórmulas siguientes, todas Δ_0 :

- $\bigvee xy \in \omega (x \in \text{Var}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \wedge y \in \text{Var}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \wedge (\beta = (x = y) \vee \beta = (x \in y))),$
- $\bigvee j \in i \bigvee \gamma \in \omega^{<\omega} (\gamma = f(j) \wedge \beta = \neg\gamma),$
- $\bigvee jk \in i \bigvee \gamma \delta \in \omega^{<\omega} (\gamma = f(j) \wedge \delta = f(k) \wedge \beta = (\gamma \rightarrow \delta)),$
- $\bigvee j \in i \bigvee \gamma \in \omega^{<\omega} \bigvee x \in \omega (\gamma = f(j) \wedge x \in \text{Var}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \wedge \beta = \bigwedge x \gamma).$

Notemos que $x \in \text{Var}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ es Δ_0 con parámetros ω , $\omega^{<\omega}$ pues si, por ejemplo, convenimos que las variables de \mathcal{L}_{tc} son los números naturales pares, de modo que la variable de índice i es $x_i = 2i$, entonces

$$x = x_i \leftrightarrow \bigvee s \in \omega^{<\omega} (\ell(s) = i + 1 \wedge s_0 = i \wedge \bigwedge j \in i s_{j+1} = s_j + 1 \wedge s_i = i),$$

$$\text{y } x \in \text{Var}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \leftrightarrow \bigvee i \in \omega x = x_i.$$

Al lector con un poco de práctica no le debería ser necesario desarrollar explícitamente la definición de $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ para convencerse de que es Δ_0 con los parámetros indicados. A poco que reflexione sobre lo que involucra la definición de fórmula se convencerá de que nunca se necesita mencionar nada que no sea un número natural, una sucesión de números naturales, una sucesión de sucesiones de números naturales o bien elementos de elementos de elementos de los conjuntos involucrados. Por ejemplo, para desarrollar $\gamma = f(j)$ hace falta referirse al par (j, γ) (que es un elemento de f) y a los conjuntos $\{j\}$ y $\{j, \gamma\}$ (que son elementos de dicho par).

El axioma de infinitud nos permite definir (por Δ_1 -especificación en el caso de KPI) el conjunto $\text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \subset \omega^{<\omega}$, y se trata de un término Δ_1 , pues la fórmula

$$Y = \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \leftrightarrow Y \subset \omega^{<\omega} \wedge \bigwedge \alpha \in \omega^{<\omega} (\alpha \in Y \leftrightarrow \alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})),$$

es Δ_0 con parámetros $\omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}$.

Similarmente se justifica que la fórmula $x_i \text{Lib}, \alpha$ que se cumple si la variable x_i está libre en α es Δ_0 con los mismos parámetros, y por lo tanto Δ_1 . En efecto:

$$x_i \text{Lib} \alpha \leftrightarrow \bigvee f \in (\omega^{<\omega})^{<\omega} \bigvee g \in \omega^{<\omega} \bigvee mn \in \omega (\mathcal{D}f = m \wedge \mathcal{D}g = n \wedge$$

$$m = n + 1 \wedge (\dots) \wedge f(n) = \alpha \wedge g(n) = 1),$$

donde los puntos suspensivos representan la fórmula Δ_0 con parámetros $\omega, \omega^{<\omega}$ y $(\omega^{<\omega})^{<\omega}$ que expresa que f es una sucesión de fórmulas que define a α y que $g(j) = 1$ si y sólo si x_i está libre en la fórmula $f(j)$.

Lo mismo vale para el término $\text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ que define el conjunto de las fórmulas de \mathcal{L}_{tc} cuyas variables libres están entre x_0, \dots, x_{n-1} , pues, en primer lugar,

$$\alpha \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \leftrightarrow n \in \omega \wedge \alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \wedge \bigwedge i \in \omega (x_i \text{Lib} \alpha \rightarrow i < n)),$$

que es Δ_0 con parámetros $\omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}$, y de aquí que

$$Y = \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \leftrightarrow (n \in \omega \wedge Y \subset \omega^{<\omega} \wedge \bigwedge \alpha \in \omega^{<\omega} (\alpha \in Y \leftrightarrow \alpha \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}))) \vee (n \notin \omega \wedge Y = \emptyset),$$

sea del mismo tipo.

En [TC, Capítulo XI] se define la relación $M \models \alpha[v]$ que determina cuándo una fórmula α de un lenguaje formal \mathcal{L} es satisfecha en un modelo M de \mathcal{L} cuando sus variables se interpretan según la valoración $v : \text{Var}(\mathcal{L}) \longrightarrow M$. En [LM, sección 12.2] se demuestra que dicha fórmula es Δ_1 en KP, pero vamos a probarlo aquí de nuevo mediante un argumento en la línea de los precedentes, que vale tanto para KPI como para ZF–AP.

Ante todo, debemos señalar una ligera diferencia en la definición de $M \models \alpha[v]$ en [LM] respecto a la definición de [TC], diferencia debida a que en KP no está disponible el axioma de partes, como tampoco lo está en ZF–AP, y esto obliga a considerar que v no recorre las aplicaciones $v : \text{Var}(\mathcal{L}) \longrightarrow M$, sino que en $M \models \alpha[v]$ hay que entender que v está definida sobre un conjunto finito de variables que incluya a todas las variables libres en α . Esto se debe a que no podemos probar que la clase $M^{\text{Var}(\mathcal{L}_{\text{tc}})}$ sea un conjunto, mientras que sí que lo es el conjunto de todos los pares (α, v) con $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ y v en las condiciones indicadas.

Esta salvedad es suficiente para que podamos probar el carácter Δ_1 de la fórmula $M \models \alpha[v]$ en KPI o ZF–AP, pero vamos a realizar algunas simplificaciones adicionales para el contexto que aquí nos interesa. En primer lugar, podemos restringirnos a modelos del lenguaje \mathcal{L}_{tc} . Puesto que el único signo eventual de \mathcal{L}_{tc} es el relator de pertenencia, en lugar de la definición general de modelo, podemos considerar que, por definición, un modelo de \mathcal{L}_{tc} es un par (M, R) , donde M es un conjunto no vacío y $R \subset M \times M$ (y esta definición es obviamente Δ_0).

En segundo lugar nos resultará más conveniente definir $(M, R) \models \alpha[v]$ con el convenio de que $v \in M^{<\omega}$ no estará definida sobre variables, sino sobre los índices de las variables, de manera que la variable x_i se interpretará como $v(i)$.

Previamente definiremos la función $H_{M,R} : \omega^{<\omega} \times M^{<\omega} \rightarrow 2$ que cumple

$$H_{M,R}(\alpha, v) = 1 \leftrightarrow M \models \alpha[v]$$

cuando $M \neq \emptyset$, $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ y v está definida sobre los índices de todas las variables libres en α , y tomará el valor 1 si falla alguno de estos supuestos. Vamos a probar que la fórmula $H = H_{M,R}$ es Δ_0 en los parámetros oportunos.

Diremos que $C \subset \omega^{<\omega}$ es *cerrado para subfórmulas* (csf) si cuando $\neg\alpha \in C$, también $\alpha \in C$, cuando $\alpha \rightarrow \beta \in C$, entonces $\alpha, \beta \in C$ y, cuando $\bigwedge x \alpha \in C$, entonces $\alpha \in C$, donde, en principio, α, β elementos arbitrarios de $\omega^{<\omega}$.

Es inmediato que la fórmula “ C es csf” es Δ_0 con parámetros $\omega, \omega^{<\omega}$. Consideramos ahora la fórmula

$$\begin{aligned} \phi(M, R, H, M^{<\omega}, C, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}) \equiv & H : C \times M^{<\omega} \rightarrow 2 \wedge \text{“}C \text{ es csf”} \wedge \\ & \bigwedge \alpha \in C \bigwedge v \in M^{<\omega} ((M = \emptyset \vee \alpha \notin \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})) \vee (M \neq \emptyset \wedge \alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \wedge \\ & \quad \forall i \in \omega (x_i \text{ Lib } \alpha \wedge i \notin \mathcal{D}v)) \rightarrow H(\alpha, v) = 1) \wedge \\ & \bigwedge \alpha \in C \bigwedge v \in M^{<\omega} (\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \wedge \bigwedge i \in \omega (x_i \text{ Lib } \alpha \rightarrow i \in \mathcal{D}v) \rightarrow \dots), \end{aligned}$$

donde los puntos suspensivos representan la disyunción de todos los casos posibles para α según la definición de fórmula junto con la condición correspondiente para que $H(\alpha, v) = 1$ si y sólo si $(M, R) \models \alpha[v]$. El lector debería considerar innecesario desarrollar dicha fórmula para convencerse de que es Δ_0 en los parámetros señalados, pero he aquí el desarrollo:

- $\forall ij \in \omega (\alpha = (x_i = x_j) \wedge (H(\alpha, v) = 1 \leftrightarrow v(i) = v(j)))$,
- $\forall ij \in \omega (\alpha = (x_i \in x_j) \wedge (H(\alpha, v) = 1 \leftrightarrow v(i) R v(j)))$,
- $\forall \beta \in C (\alpha = \neg\beta \wedge (H(\alpha, v) = 1 \leftrightarrow H(\beta, v) = 0))$
- $\forall \beta \gamma \in C (\alpha = (\beta \rightarrow \gamma) \wedge (H(\alpha, v) = 1 \leftrightarrow (H(\beta, v) = 0 \vee H(\gamma, v) = 1)))$
- $\forall i \in \omega \forall \beta \in C (\alpha = \bigwedge x_i \beta \wedge (H(\alpha, v) = 1 \leftrightarrow \bigwedge a \in M \bigvee w \in M^{<\omega} (w = v_i^a \wedge H(\beta, w) = 1)))$,

donde $w = v_i^a$ significa que w tiene el mismo dominio que v y coincide con v salvo en que $w(i) = a$.

Ahora una simple inducción sobre la longitud de α muestra que para todo $\alpha \in \omega^{<\omega}$ existe un $C \subset \omega^{<\omega}$ cerrado para subfórmulas y existe un H de modo que $\alpha \in C$ y $\phi(M, R, H, M^{<\omega}, C, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega})$, así como que dos H que cumplan esto coinciden sobre su dominio común.

Esto nos permite definir $H_{M,R} : \omega^{<\omega} \times M^{<\omega} \rightarrow 2$ por especificación (Δ_1 -especificación en el caso de KPI) a partir del conjunto $\omega^{<\omega} \times M^{<\omega} \times 2$ mediante la fórmula $\psi(x, M, R, M^{<\omega}, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega})$ dada por

$$\begin{aligned} & \forall CH \forall \alpha \in C \forall v \in M^{<\omega} \forall i \in \omega (x = (\alpha, v, i) \wedge \\ & \phi(M, H, M^{<\omega}, C, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}) \wedge H(\alpha, v) = i) \leftrightarrow \\ & \quad \wedge CH \wedge \alpha \in C \wedge v \in M^{<\omega} \wedge i \in \omega (x = (\alpha, v, i) \wedge \\ & \quad \phi(M, R, H, M^{<\omega}, C, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}) \rightarrow H(\alpha, v) = i). \end{aligned}$$

Ahora es claro que existe una única función $H_{M,R} : \omega^{<\omega} \times M^{<\omega} \rightarrow 2$ que cumple

$$\phi(M, R, H_{M,R}, M^{<\omega}, \omega^{<\omega}, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}),$$

con lo que la fórmula (de variables libres H, M, R)

$$H = H_{M,R} \leftrightarrow \phi(M, R, H, M^{<\omega}, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega})$$

es Δ_0 con parámetros $\omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}, M^{<\omega}$, luego el término $H_{M,R}$ es Δ_1 , y podemos definir

$$\begin{aligned} (M, R) \models \alpha[v] \equiv H_{M,R}(\alpha, v) = 1 & \leftrightarrow \forall H (H = H_{M,R} \wedge H(\alpha, v) = 1) \\ & \leftrightarrow \wedge H (H = H_{M,R} \rightarrow H(\alpha, v) = 1), \end{aligned}$$

que es, pues, una fórmula Δ_1 .

En la práctica usaremos la notación

$$(M, R) \models \alpha[a_1, \dots, a_n]$$

en lugar de $(M, R) \models \alpha[s]$, donde hay que entender que las variables libres de α están entre x_0, \dots, x_n y que estamos interpretando x_i como $s(i) = a_{i+1} \in M$.

Definimos⁶

$$(M, R) \models \alpha \equiv \wedge v \in M^{<\omega} (M, R) \models \alpha[v]$$

y

$$(M, R) \models \Gamma \equiv \wedge \gamma \in \Gamma (M, R) \models \Gamma.$$

Ambas fórmulas son Δ_1 . Por ejemplo, para la segunda tenemos que

$$\begin{aligned} (M, R) \models \Gamma & \leftrightarrow \forall H (H = H_{M,R} \wedge \wedge \gamma \in \Gamma \wedge v \in M^{<\omega} H(\gamma, v) = 1) \\ & \leftrightarrow \wedge H (H = H_{M,R} \rightarrow \wedge \gamma \in \Gamma \wedge v \in M^{<\omega} H(\gamma, v) = 1). \end{aligned}$$

⁶ Aquí hay que tener en cuenta que hemos definido $(M, R) \models \alpha[v]$ como trivialmente verdadera si α no es una fórmula o v no está definida sobre (los índices de) todas sus variables libres.

Para referencia posterior enunciamos el teorema siguiente, ya demostrado:

Teorema 1.3 *Para todo par de conjuntos (M, R) consideramos la aplicación $H_{M,R} : \omega^{<\omega} \times M^{<\omega} \rightarrow 2$ dada por*

$$H_{M,R}(\alpha, v) = 1 \leftrightarrow M \models \alpha[v]$$

cuando $M \neq \emptyset$, $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ y v está definida sobre los índices de todas las variables libres en α , y tomará el valor 1 si falla alguno de estos supuestos. Entonces

$$H = H_{M,R} \leftrightarrow \Phi_{M,R}(M, R, H, M^{<\omega}, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}),$$

para una cierta fórmula $\Phi_{M,R}$ de tipo Δ_0 . Más aún, si $C \subset \omega^{<\omega}$ es cerrado para subfórmulas, la restricción $H_{M,R}^C : C \times M^{<\omega} \rightarrow 2$ cumple

$$H = H_{M,R}^C \leftrightarrow \Phi_{M,R}^C(M, R, H, M^{<\omega}, C, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}),$$

donde $\Phi_{M,R}^C$ también es Δ_0 .

1.5 Consistencia y existencia de modelos

Terminamos este capítulo de preliminares recordando la conexión que existe entre los conceptos de la sección precedente y los teoremas de incompletitud de Gödel. El lector que quiera conocer los detalles de esta sección deberá estudiarse a fondo la mayor parte de [LM]. No obstante, nada de lo que veremos aquí es esencial para seguir este libro.

En cualquiera de las teorías T que estamos considerando (ZF–AP, KPI o cualquiera de sus extensiones), es posible definir el conjunto $\lceil T \rceil \subset \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$, así como el concepto de deducción lógica a partir de unos axiomas dados, y en particular podemos definir la sentencia $\text{Consis } T$ que afirma que T es consistente, es decir, que de T no se puede deducir lógicamente una contradicción.

En la introducción hemos explicado que dicha sentencia es equivalente a una sentencia aritmética, es decir, a una sentencia que involucra únicamente números naturales con la suma y el producto o, más simplemente aún, se puede probar que equivale a que una ecuación diofántica no tenga solución:

$$\text{Consis } T \leftrightarrow \neg \bigvee x_1 \cdots x_n \in \mathbb{Z} P(x_1, \dots, x_n) = 0,$$

donde n es un número natural concreto que podríamos calcular y P representa un polinomio $P \in \mathbb{Z}[x_1, \dots, x_n]$ que podríamos construir explícitamente a partir de T .

La relación con la teoría de modelos nos la da el teorema de completitud de Gödel, en virtud del cual, en T se puede probar que

$$\text{Consis } T \leftrightarrow \bigvee MR (M, R) \models T,$$

es decir, que T es consistente si y sólo si tiene un modelo.

Ahora podemos precisar lo que explicábamos en la introducción sobre que no es posible demostrar que ZFC es consistente. Tal y como indicábamos allí, el segundo teorema de incompletitud de Gödel afirma que, si la teoría T es recursiva, sólo puede suceder

$$\vdash_T \text{Consis } T$$

si la teoría T es contradictoria (en cuyo caso en T puede probarse cualquier cosa, en particular $\text{Consis } T$). Más concretamente, si T es consistente es imposible demostrar en T la existencia de un modelo de T , por lo que, automáticamente, cualquier sentencia que implique la existencia de un modelo de T tiene que ser indemostrable en T .

La razón por la que podremos prescindir en todo momento de este hecho es que más adelante demostraremos directamente una versión ligeramente más débil, pero suficiente en nuestro contexto:

Llamaremos *modelos naturales* de \mathcal{L}_{tc} a los modelos (M, R) en los que la relación R es la pertenencia, es decir,

$$R = \{(x, y) \in M \mid x \in y\}.$$

En tal caso podemos omitir toda referencia a R y escribir $M \models \alpha[x_1, \dots, x_n]$ en lugar de $(M, R) \models \alpha[x_1, \dots, x_n]$.

A lo largo de este libro nos van a interesar casi exclusivamente los modelos naturales de \mathcal{L}_{tc} y, más concretamente los *modelos transitivos* (aquellos en los que M es un conjunto transitivo).

La afirmación más débil que el segundo teorema de incompletitud que demostraremos más adelante es que, en cualquier teoría de conjuntos T (recursiva) que extienda a KPI o a ZF–AP, no es posible demostrar la existencia de un modelo natural de T .

En todas las consecuencias que nos van a interesar del segundo teorema de incompletitud siempre podremos reemplazarlo por este último resultado.

Capítulo II

Modelos de ZF

Iniciamos aquí el estudio de los modelos de ZF y de las subteorías que hemos considerado en el capítulo anterior presentando algunos resultados generales junto con el estudio de algunos ejemplos concretos y las aplicaciones que se derivan de ellos.

2.1 Relativización de expresiones

En primer lugar vamos a ver es que es posible dar una definición alternativa de modelo, que es la que se utiliza más habitualmente en este contexto, y que es muy distinta de la considerada en el capítulo anterior (la propia de la teoría de modelos). La diferencia más notable es que aquélla sólo permite considerar a los conjuntos como modelos, mientras que la que vamos a exponer ahora es válida para clases propias.

La situación es que $(M, R) \models \phi$ es una fórmula con tres variables libres que puede definirse en cualquier teoría suficientemente potente como para demostrar un teorema de recursión adecuado, y es precisamente para que dicho teorema sea aplicable que se requiere que M y R sean conjuntos. Sin embargo, cuando aplicamos dicha fórmula a una sentencia concreta, como por ejemplo el axioma del par, obtenemos una fórmula con dos variables libres:

$$(M, R) \models \Lambda xy \vee z \Lambda u (u \in z \leftrightarrow u = x \vee u = y)$$

en la que la definición de \models puede desarrollarse hasta

$$\Lambda xy \in M \vee z \in M \Lambda u \in M (u R z \leftrightarrow u = x \vee u = y).$$

Ahora bien, sucede que esta última fórmula (en la que ya no aparece \models) tiene sentido incluso si M y R son clases propias. En general, para cada fórmula concreta $\phi(x_1, \dots, x_n)$ que consideremos, la fórmula $(M, R) \models \phi[x_1, \dots, x_n]$ puede desarrollarse hasta una fórmula $\phi^{MR}(x_1, \dots, x_n)$ que tiene sentido incluso si M y R son clases propias, pero que cuando son conjuntos es equivalente a la fórmula de partida.

Lo que vamos a hacer ahora es definir $\phi^{MR}(x_1, \dots, x_n)$ directamente, sin pasar por la definición de \models , de modo que no necesitaremos exigir que M y R sean conjuntos. Notemos que para que esto tenga sentido ϕ tiene que ser una fórmula concreta, es decir, una fórmula metamatemática que podamos transformar metamatemáticamente en otra fórmula ϕ^{MR} concreta mediante una definición recurrente metamatemática, en particular sin hacer referencia a ningún teorema formal de recursión demostrado en ninguna teoría formal en particular. Puesto que consideramos expresiones metamatemáticas, admitiremos que tengan descriptores:

Definición 2.1 Si θ es una expresión (metamatemática) de \mathcal{L}_{tc} y $x \in M$, $x R y$ son dos fórmulas¹ cuyas variables libres (distintas de x e y) no están en θ , definimos la *relativización* θ^{MR} (resp. θ^M) como la expresión construida según las reglas siguientes:

- $x^{MR} \equiv x$ para toda variable x ,
- $(t_1 = t_2)^{MR} \equiv t_1^{MR} = t_2^{MR}$,
- $(t_1 \in t_2)^{MR} \equiv t_1^{MR} R t_2^{MR}$ (o $(t_1 \in t_2)^M \equiv t_1^M \in t_2^M$),
- $(\neg\alpha)^{MR} \equiv \neg\alpha^{MR}$,
- $(\alpha \rightarrow \beta)^{MR} \equiv \alpha^{MR} \rightarrow \beta^{MR}$,
- $(\bigwedge x \alpha)^{MR} \equiv \bigwedge x \in M \alpha^{MR}$,
- $(x|\alpha)^{MR} \equiv x|(x \in M \wedge \alpha^{MR})$.

De aquí se deduce a su vez que

$$\begin{aligned} (\alpha \vee \beta)^{MR} &\equiv \alpha^{MR} \vee \beta^{MR}, & (\alpha \wedge \beta)^{MR} &\equiv \alpha^{MR} \wedge \beta^{MR}, \\ (\alpha \leftrightarrow \beta)^{MR} &\equiv \alpha^{MR} \leftrightarrow \beta^{MR}, & (\forall x \alpha)^{MR} &\equiv \forall x \in M \alpha^{MR}. \end{aligned}$$

En definitiva, relativizar una expresión θ se reduce a realizar sistemáticamente los cambios siguientes:

- Cambiar cada subfórmula $x \in y$ por $x R y$ (o no, en el caso de θ^M).
- Cambiar cada $\bigwedge x$ por $\bigwedge x \in M$ (lo que a su vez implica cambiar cada $\forall x$ por $\forall x \in M$).
- Cambiar cada $x|$ por $x|(x \in M \wedge \dots)$.

La idea subyacente es que si t es un término, entonces t^{MR} es *lo que llamaría t alguien que sólo “viera” los conjuntos de la clase M y “creyera” que la relación de pertenencia entre ellos no es la pertenencia “de verdad”, sino la relación R* (pero en el caso de t^M dejamos que nuestro “alguien” “vea” la pertenencia “de verdad” en la clase M).

¹Notemos que esto es lo mismo que decir que M y R son clases, no necesariamente conjuntos.

Por ejemplo, $\emptyset^{MR} \equiv (x | \bigwedge u u \notin x)^{MR} \equiv x | (x \in M \wedge \bigwedge u \in M \neg u Rx)$, y esto significa que \emptyset^{MR} es el único conjunto de M para el cual no existe ningún otro $u \in M$ tal que $u Rx$ (sin perjuicio de que \emptyset^{MR} pueda ser la descripción impropia).

Similarmente, si ϕ es una fórmula, entonces ϕ^{MR} es *lo que tiene que suceder para que alguien que sólo “vea” los conjuntos de M y “confunda” la pertenencia con la relación R “crea” que se cumple ϕ* .

Por ejemplo, la relativización del axioma del conjunto vacío es

$$(\forall x \bigwedge u u \notin x)^{MR} \equiv \forall x \in M \bigwedge u \in M \neg u Rx.$$

Si unas clases M y R cumplen esto y además cumplen la relativización del axioma de extensionalidad:

$$(\bigwedge xy (\bigwedge u (u \in x \leftrightarrow u \in y) \rightarrow x = y))^{MR},$$

que equivale claramente a

$$\bigwedge xy \in M (\bigwedge u \in M (u Rx \leftrightarrow u Ry) \rightarrow x = y),$$

entonces es claro que $\bigvee^1 x \in M \bigwedge u \in M \neg u Rx$, por lo que \emptyset^{MR} es una descripción propia.

Definición 2.2 Si $\Gamma = \{\gamma_1, \dots, \gamma_n\}$ es un conjunto finito de fórmulas (metamatemáticas) de \mathcal{L}_{tc} y M, R son como en la definición anterior, escribiremos

$$(M, R) \models \Gamma \equiv \bigwedge x_1 \cdots x_m \in M (\gamma_1 \wedge \cdots \wedge \gamma_n)^{MR}$$

(o bien $M \models \Gamma \equiv \bigwedge x_1 \cdots x_m \in M (\gamma_1 \wedge \cdots \wedge \gamma_n)^M$), donde x_1, \dots, x_m son las variables libres en $\gamma_1 \wedge \cdots \wedge \gamma_n$.

Notemos que la definición no tendría sentido para infinitas fórmulas, pues no podríamos formar la conjunción de todas ellas. Así tenemos una definición alternativa de $(M, R) \models \Gamma$ en la que M y R pueden ser clases propias. Antes de compararla con la anterior enunciamos el resultado básico (demostrable en cualquier teoría de conjuntos que extienda a la teoría básica B):

Teorema 2.3 Sean M y R dos clases tales que $(x | x = x) \in M$. Entonces:

- a) Para todo término $t(x_1, \dots, x_n)$ de \mathcal{L}_{tc} cuyas variables libres estén entre las indicadas, se cumple

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in M t^{MR}(x_1, \dots, x_n) \in M.$$

- b) Si Γ es un conjunto finito de fórmulas de \mathcal{L}_{tc} , $(M, R) \models \Gamma$ y γ es una fórmula tal que $\Gamma \vdash \gamma$, entonces $(M, R) \models \gamma$.

El lector que esté acostumbrado a razonar informalmente, es decir, sin apoyarse en la lógica formal, debería considerar “inmediato” el teorema anterior. En efecto, para el apartado a) basta tener en cuenta que t^{MR} es “lo que llamaría t alguien que sólo vea los conjuntos de M ”, luego, por definición, es un objeto de M . Más precisamente, o bien t es una variable, en cuyo caso estamos suponiendo que está en M , o bien t es una descripción, con lo que $t^{MR} \equiv x | (x \in M \wedge \dots)$ y, o bien es la descripción impropia (y la suponemos en M), o bien es una descripción propia, y entonces es el único $x \in M$ tal que \dots , luego en cualquier caso está en M .

Respecto del apartado b), afirma simplemente que si alguien que “viva” en M “cree” que se cumplen las fórmulas de Γ y γ es una consecuencia lógica de Γ , entonces también tiene que “creer” que se cumple Γ , porque eso es lo que significa “consecuencia lógica”, algo que se cumple necesariamente cuando se cumplen las premisas.

Más precisamente, si existe un razonamiento que prueba γ partiendo de las premisas de Γ , al modificarlo cambiando sistemáticamente la palabra “conjunto” por “conjunto de M ” y “pertenencia” por la relación R , obtenemos un argumento igual de válido de que $M \models \Gamma$ implica $M \models \gamma$.

La única forma de precisar más estos argumentos informales es recurrir al concepto técnico de demostración lógica y para ello remitimos a [LM]. Concretamente, la definición de relativización es un caso particular de la definición [LM 3.28] de interpretación de un lenguaje formal en otro, y el teorema anterior es un caso particular² de [LM 3.29] y [LM 3.30].

Nota Hay que señalar que en el enunciado del teorema anterior hemos cometido un abuso de notación que repetiremos a menudo para que los enunciados se lean de forma más natural, y que consiste en mezclar hipótesis metamatemáticas con hipótesis matemáticas. Técnicamente el teorema anterior es un esquema teorematíco que debería enunciarse así:

Fijadas unas fórmulas (metamatemáticas) $x \in M$, $x R y$, γ , un conjunto finito de fórmulas Γ tal que $\Gamma \vdash \gamma$ y un término t , entonces,

$$\vdash_B (x|x=x) \in M \rightarrow \bigwedge x_1 \dots x_n \in M t^{MR}(x_1, \dots, x_n) \in M,$$

$$\vdash_B (x|x=x) \in M \wedge (M, R) \models \Gamma \rightarrow M, R \models \gamma.$$

de modo que tenemos un teorema distinto para cada elección de las fórmulas y términos metamatemáticos indicados. ■

Tal y como se explica en [LM, sección 12.2], el análogo al teorema 2.3 b), que no es sino la formalización de la prueba metamatemática del teorema de corrección, es válido también para modelos en el sentido de la teoría de modelos.

²En los términos de [LM 3.28], la teoría S es la teoría que tiene por axiomas las sentencias de Γ , mientras que la teoría T es la teoría en la que se demuestra el teorema, que puede ser B o cualquier extensión suya, en la que se demuestren las hipótesis.

Así pues, tenemos dos definiciones distintas de $(M, R) \models \Gamma$ cuya interpretación es la misma: ambas representan lo que tiene que suceder para que alguien que “viva” en el modelo (M, R) , es decir, alguien que sólo “vea” los conjuntos de M y “crea” que la relación de pertenencia entre dichos conjuntos es la dada por la relación R juzgue que las fórmulas de Γ son verdaderas. Sin embargo, hay diferencias técnicas entre ambas definiciones que resultan cruciales:

- La definición de $(M, R) \models \gamma$ en términos de relativizaciones tiene sentido cuando M y R son clases cualesquiera (no necesariamente conjuntos), pero requiere entender γ como una fórmula metamatemática, de modo que no tenemos una única fórmula $(M, R) \models \gamma \equiv \bigwedge x_1 \dots x_n \in M \gamma^{MR}$, sino que esto es una fórmula distinta de \mathcal{L}_{tc} para cada fórmula γ de \mathcal{L}_{tc} que consideremos, y sus variables libres son las que aparezcan en la fórmula $x \in M$ distintas de x y las que aparezcan en $x R y$ distintas de x e y .
- En cambio la definición de $(M, R) \models \gamma$ en el sentido de la teoría de modelos es una única fórmula de \mathcal{L}_{tc} con tres variables libres M, R, γ , pero sólo tiene sentido cuando M y R son conjuntos (y sólo puede definirse en una teoría suficientemente potente como para formalizar la definición recurrente, como KPI o ZF–AP).
- La expresión $(M, R) \models \Gamma$ definida a partir del concepto de relativización sólo tiene sentido en el caso en que Γ es una colección finita de fórmulas metamatemáticas, mientras que la expresión en el sentido de la teoría de modelos está definida para todo conjunto de sentencias Γ de \mathcal{L}_{tc} , finito o infinito.

Por otra parte, cuando las dos definiciones de $(M, R) \models \Gamma$ tienen sentido, son equivalentes en el sentido que precisa el teorema siguiente (que es un caso particular de [LM 12.11]):

Teorema 2.4 *Sea M un conjunto y $R \subset M \times M$. Si ϕ es una sentencia (metamatemática) sin descriptores, entonces*

$$(M, R) \models \lceil \phi \rceil \leftrightarrow \phi^{MR}.$$

Aquí hemos usado excepcionalmente los ángulos de Quine para diferenciar la sentencia metamatemática ϕ de su versión matemática correspondiente $\lceil \phi \rceil$.

En la práctica esto significa que si M y R son conjuntos no necesitamos precisar si en

$$(M, R) \models \bigvee x \bigwedge u u \notin x$$

la sentencia $\bigvee x \bigwedge u u \notin x$ es metamatemática o su versión matemática correspondiente, pues en ambos casos la expresión anterior equivale a que

$$\bigvee x \in M \bigwedge u \in M \neg u R x.$$

Más informalmente, $(M, R) \models \phi$ significa siempre “lo que tiene que significar” y, cuando las dos versiones tienen sentido, ambas significan lo mismo.

Por último, hay que señalar que en muchas ocasiones podemos dar sentido a una expresión $(M, R) \models \Gamma$ en su sentido metamatemático cuando Γ es un conjunto infinito de sentencias metamatemáticas:

- a) Cuando $(M, R) \models \Gamma$ figure en la hipótesis de un teorema (con Γ infinito) se entenderá como que existe un subconjunto finito Γ_0 de Γ de modo que el teorema se cumple con la hipótesis $(M, R) \models \Gamma_0$.
- b) Cuando $(M, R) \models \Gamma$ figure en la conclusión de un teorema se entenderá como un esquema teoremativo, es decir, como que puede demostrarse $(M, R) \models \Gamma_0$ para cualquier subconjunto finito Γ_0 de Γ .
- c) Cuando un teorema tenga $(M, R) \models \Gamma$ en su hipótesis y $(N, S) \models \Delta$ en su conclusión, se entenderá como que, para todo subconjunto finito Δ_0 de Δ existe un subconjunto finito Γ_0 de Γ de modo que, bajo la hipótesis $(M, R) \models \Gamma_0$ puede probarse $(N, S) \models \Delta_0$.

Discutiremos esto con más detalle cuando nos encontramos con ejemplos concretos. En cualquiera de estos casos leeremos la expresión $(M, R) \models \Gamma$ (que será una fórmula si Γ es finito o un esquema de fórmulas en caso contrario) diciendo que (M, R) es un *modelo* de Γ . En este contexto, al igual que en el contexto de la teoría de modelos, podemos hablar también de *modelos naturales*, de Γ , que son las clases M que cumplen $M \models \Gamma$ y de *modelos transitivos*, que son los modelos naturales determinados por clases transitivas.

Los modelos transitivos determinados por clases propias se llaman *modelos internos* y son, pues, los modelos transitivos metamatemáticos que no pueden verse como modelos en el sentido de la teoría de modelos.

Nota Cuando consideremos un modelo transitivo M supondremos siempre que $\emptyset = (x|x = x) \in M$ ■

Pruebas de consistencia Ahora podemos describir el esquema general de cualquiera de las pruebas de consistencia que vamos a presentar:

Supongamos que tenemos dos teorías S y T sobre el lenguaje \mathcal{L}_{tc} y sea Γ la colección de los axiomas de T . Supongamos que en S podemos definir clases M, R y demostrar³ que $(M, R) \models \Gamma$. Entonces podemos afirmar que si S es consistente también lo es T .

En efecto, si pudiera probarse una contradicción a partir de T , digamos $\alpha \wedge \neg\alpha$ (donde podemos suponer que α es una sentencia), la demostración usaría únicamente una cantidad finita Γ_0 de axiomas de T , y en S sabemos demostrar que $(M, R) \models \Gamma_0$, luego por el teorema 2.3 tenemos que en S se puede demostrar $(M, R) \models \alpha \wedge \neg\alpha$, es decir, $\alpha^{MR} \wedge \neg\alpha^{MR}$, con lo cual tenemos una demostración de una contradicción en S y podemos concluir que S es contradictoria también.

³Si Γ tiene infinitos axiomas, esto debe entenderse como acabamos de explicar, es decir, que en S podemos demostrar $(M, R) \models \Gamma_0$, para todo subconjunto finito Γ_0 de Γ .

La prueba es totalmente constructiva, en el sentido de que podemos programar a un ordenador para que, si le damos una demostración de una contradicción en T y una demostración en S de $(M, R) \models \Gamma_0$, donde Γ_0 es el conjunto de axiomas de T usados en la prueba de la contradicción, el ordenador producirá una demostración de una contradicción en S .

2.2 Modelos transitivos, expresiones absolutas

En esta sección trabajamos en cualquier extensión de KPI o de ZF–AP. El interés de los modelos transitivos se debe a que muchos de los conceptos conjuntistas básicos son absolutos para modelos transitivos en el sentido siguiente:

Definición 2.5 Dadas dos clases $M \subset N$, una fórmula $\phi(x_1, \dots, x_n)$ es *absoluta hacia arriba* para $M - N$ si

$$\bigwedge x_1 \dots x_n \in M (\phi^M(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \phi^N(x_1, \dots, x_n)),$$

la fórmula ϕ es *absoluta hacia abajo* para $M - N$ si

$$\bigwedge x_1 \dots x_n \in M (\phi^N(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \phi^M(x_1, \dots, x_n)),$$

y ϕ es *absoluta* para $M - N$ si lo es hacia arriba y hacia abajo, es decir, si

$$\bigwedge x_1 \dots x_n \in M (\phi^M(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \phi^N(x_1, \dots, x_n)).$$

Un término $t(x_1, \dots, x_n)$ es *absoluto* para $M - N$ si

$$\bigwedge x_1 \dots x_n \in M (t^M(x_1, \dots, x_n) = t^N(x_1, \dots, x_n)).$$

Es claro que esto equivale a que la fórmula $x = t$ sea absoluta para $M - N$, donde x es una variable que no esté en t .

Una expresión se dice *absoluta* para una clase M si lo es para $M - V$.

Notemos que relativizar una fórmula a la clase universal V significa sustituir cada $\bigwedge x$ por $\bigwedge x \in V$, pero $x \in V$ es una fórmula trivialmente cierta, por lo que $\phi \leftrightarrow \phi^V$. Así pues, una fórmula ϕ es absoluta para una clase M si y sólo si

$$\bigwedge x_1 \dots x_n \in M (\phi^M(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \phi(x_1, \dots, x_n)),$$

es decir, si alguien que “vive” en M no se equivoca nunca al juzgar si unos conjuntos dados (de M) cumplen o no ϕ .

El interés de esto es que hay muchos conceptos absolutos para modelos transitivos:⁴

Teorema 2.6 *Toda fórmula Σ_1 respecto de una teoría T es absoluta hacia arriba para modelos transitivos de T , toda fórmula Π_1 es absoluta hacia abajo y toda fórmula Δ_1 es absoluta.*

⁴Este teorema está demostrado en [LM 12.13], pero repetimos aquí la prueba.

DEMOSTRACIÓN: Veamos en primer lugar que toda fórmula α de tipo Δ_0 (en sentido estricto) es absoluta para conjuntos transitivos (no vacíos). Razonamos por inducción sobre la longitud de α . Si $\alpha \equiv x = y$ o $\alpha \equiv x \in y$ es inmediato, porque $\alpha^M \equiv \alpha$.

Si $\alpha \equiv \neg\beta(x_1, \dots, x_n)$ y el teorema vale para β , también vale para α , pues por hipótesis de inducción tenemos que si M es un conjunto transitivo

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in M (\beta^M(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \beta(x_1, \dots, x_n)),$$

y esto implica que

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in M (\neg\beta^M(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \neg\beta(x_1, \dots, x_n)).$$

El caso en que $\alpha \equiv \beta \rightarrow \gamma$ es similar. Veamos por último el caso en que $\alpha \equiv \bigwedge x \in y \beta(x, y, x_1, \dots, x_n)$. Por hipótesis de inducción, si M es transitivo tenemos que

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n xy \in M (\beta^M(x, y, x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \beta(x, y, x_1, \dots, x_n)),$$

de donde

$$\begin{aligned} \bigwedge x_1 \cdots x_n xy \in M ((x \in y \rightarrow \beta^M(x, y, x_1, \dots, x_n)) \leftrightarrow \\ (x \in y \rightarrow \beta(x, y, x_1, \dots, x_n))), \end{aligned}$$

y en este punto usamos la transitividad de M para deducir que

$$\begin{aligned} \bigwedge x_1 \cdots x_n y \in M (\bigwedge x (x \in y \rightarrow \beta^M(x, y, x_1, \dots, x_n)) \leftrightarrow \\ \bigwedge x (x \in y \rightarrow \beta(x, y, x_1, \dots, x_n))). \end{aligned}$$

En principio deberíamos haber puesto $\bigwedge x \in M$, pero el hecho de que $y \in M$ ya implica, por la transitividad de M , que $x \in M$, luego llegamos a que

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n y \in M (\alpha^M(y, x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \alpha(y, x_1, \dots, x_n)).$$

Con esto tenemos probado que las fórmulas Δ_0 son absolutas para modelos transitivos. Ahora supongamos que $\phi(x_1, \dots, x_n)$ es Σ_1 respecto de una teoría T y que M es un modelo transitivo de T . Por hipótesis existe una fórmula α de tipo Δ_0 tal que $\vdash_T \phi \leftrightarrow \forall x \alpha$, luego

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in M (\phi^M(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \forall x \in M \alpha(x, x_1, \dots, x_n)),$$

y es claro entonces que

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in M (\phi^M(x_1, \dots, x_n) \rightarrow \forall x \alpha(x, x_1, \dots, x_n)),$$

luego ϕ es absoluta hacia arriba. La prueba para fórmulas Π_1 es análoga, y estos dos casos implican que las fórmulas Δ_1 son absolutas. ■

Así pues, todos los conceptos básicos que en el capítulo anterior hemos probado que son Δ_0 o Δ_1 (en particular los listados en [LM B.3]) son absolutos para modelos transitivos de las teorías correspondientes.

Notemos que cada prueba de que un término es absoluto se traduce en una propiedad de clausura de los modelos transitivos. Por ejemplo, el hecho de que $x \cup y$ es absoluto para modelos transitivos de la teoría básica B se traduce en que si M es un modelo transitivo de B entonces $\bigwedge xy \in M \ x \cup y \in M$.

En efecto, si $x, y \in M$, entonces $x \cup y = (x \cup y)^M \in M$. Informalmente, si $x, y \in M$, alguien que “vive” en M tiene que “ver” un conjunto que cumpla la definición de $x \cup y$ y, como la unión es absoluta, dicho conjunto será $x \cup y$, luego concluimos que $x \cup y \in M$.

Otra propiedad de clausura importante es la siguiente:

Teorema 2.7 *Si M es un modelo transitivo de la teoría básica de conjuntos B, entonces $\mathcal{P}^f M \subset M$.*

DEMOSTRACIÓN: Veamos, por inducción sobre $|x|$, que si $x \subset M$ es finito, entonces $x \in M$. Si $|x| = 0$ es que $x = \emptyset$ y basta tener en cuenta que \emptyset es absoluto, luego $\emptyset = \emptyset^M \in M$.

Si vale para conjuntos de cardinal n y $|x| = n + 1$, entonces $x = x_0 \cup \{u\}$, para un cierto $u \in x \subset M$. Como $x_0 \in M$ y $|x_0| = n$, por hipótesis de inducción $x_0 \in M$ y, como $u \in M$ y $\{u\}$ es absoluto, también $\{u\} \in M$. Por último, como $x \cup y$ es absoluto, tenemos que $x = x_0 \cup \{u\} \in M$. ■

De aquí podemos concluir:

Teorema 2.8 *La fórmula “ x es finito” (y, por consiguiente, “ x es infinito”) es absoluta para modelos transitivos de B.*

DEMOSTRACIÓN: Tenemos que “ $x \in \omega$ ” es absoluto para M , y por definición, x es finito $\leftrightarrow \bigvee fn(n \in \omega \wedge f : n \longrightarrow x \text{ biyectiva})$. Es inmediato entonces que si $x \in M$ cumple x es finito M , entonces x es finito y, recíprocamente, si $x \in M$ es finito, tenemos que existe $n \in \omega$ y $f : n \longrightarrow x$ biyectiva, y por transitividad $f \subset M$ y además f es finita, luego por el teorema anterior $f \in M$, luego $(n \in \omega \wedge f : n \longrightarrow x \text{ biyectiva})^M$, es decir, x es finito M . ■

Observemos [LM B.3] que “ser finito” es una propiedad Σ_1 , mientras que ser Dedekind-finito es Π_1 , y ambas propiedades son equivalentes bajo el axioma de elección, por lo que en ZFC ser finito es Δ_1 . Sin embargo, el teorema anterior prueba que la finitud es absoluta para modelos transitivos de B, aunque la finitud no sea Δ_1 en B.

Hemos visto que “ser un ordinal” es Δ_0 respecto de cualquier teoría en la que se cumpla el axioma de regularidad. Ahora bien, el axioma de regularidad:

$$\bigwedge x(x \neq \emptyset \rightarrow \bigvee u \in x \ u \cap x = \emptyset)$$

es Π_1 , pues la fórmula tras $\bigwedge x$ es Δ_0 , luego es absoluto hacia abajo y, como se cumple en V (porque estamos trabajando en KPI o ZF–AP) se cumple en todo conjunto transitivo. Por lo tanto, todo modelo transitivo de B es, de hecho, un modelo transitivo de $B +$ regularidad, luego “ser un ordinal” es absoluto para modelos transitivos de B . Esto nos permite extraer ciertas consecuencias sobre los ordinales de un modelo:

Definición 2.9 Para cada clase M , llamaremos $\Omega^M = \Omega \cap M$.

Así, $\Omega^M \subset M$ es lo que alguien que “viva” en M “cree” que es la clase de todos los ordinales (pero “en verdad” será un conjunto si M lo es).

Teorema 2.10 Si M es un modelo transitivo de la teoría básica de conjuntos B , entonces $\Omega^M = \Omega$ o bien Ω^M es un ordinal límite.

DEMOSTRACIÓN: Ω^M es una clase transitiva por ser intersección de dos clases transitivas. Pero toda clase transitiva de ordinales es un ordinal (la clase Ω o un elemento de Ω). En el caso en que $\Omega^M \in \Omega$, ciertamente $\emptyset = \emptyset^M \in \Omega^M$, luego $\Omega^M \neq 0$ y, como en B puede probarse que $\bigwedge \alpha \in \Omega \wedge \alpha \cup \{\alpha\} \in \Omega$, se cumple la relativización de esto a M , que es $\bigwedge \alpha \in \Omega^M \wedge \alpha \cup \{\alpha\} \in \Omega^M$, lo que prueba que Ω^M es un ordinal límite. ■

Si M es un modelo transitivo de KP o de ZF–AP, donde puede definirse el rango de un conjunto (y es absoluto, porque hemos visto que es Δ_1), resulta que, para cada $x \in M$, se cumple que $\alpha = \text{rang } x \in M$, luego $\alpha \in \Omega^M$. Por lo tanto, si $\Omega^M = \lambda$ es un ordinal límite, se cumple que $M \subset V_\lambda$ y, si suponemos AP, entonces V_λ es un conjunto. En definitiva:

Teorema 2.11 (ZF) Si M es un modelo transitivo de KPI o de ZF–AP, se cumple que M es un conjunto si y sólo si Ω^M es un conjunto (luego un ordinal límite).

Otros ejemplos de relativización Cuando, en el transcurso de un argumento, es necesario comprobar que una fórmula es absoluta, pero no es necesario analizar su posición en la jerarquía de Lévy, puede ser mucho más sencillo comprobar dicho carácter absoluto relativizando la definición o cualquier caracterización que resulte más conveniente. Por ejemplo, una forma sencilla de probar que el producto de ordinales es absoluto (admitiendo ya probado que lo es la suma) es la siguiente:

Sea M un modelo transitivo de KP o de ZF–AP, o de cualquier teoría en la que se puede definir el producto de ordinales. En dicha teoría se demuestra que

$$\bigwedge \alpha \alpha \cdot 0 = 0 \wedge \bigwedge \alpha \beta \alpha \cdot (\beta + 1) = \alpha \cdot \beta + \alpha \wedge \bigwedge \lambda \alpha \cdot \lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} \alpha \cdot \delta.$$

Por lo tanto, se tiene que cumplir la relativización a M de esta afirmación, que es:

$$\begin{aligned} \bigwedge \alpha \in \Omega^M \alpha \cdot^M 0 &= 0 \wedge \bigwedge \alpha \beta \in \Omega^M \alpha \cdot^M (\beta + 1) = \alpha \cdot^M \beta + \alpha \wedge \\ \bigwedge \lambda \in \Omega^M \alpha \cdot^M \lambda &= \bigcup_{\delta < \lambda} \alpha \cdot^M \delta. \end{aligned}$$

Aquí hemos usado que “ser un ordinal” es absoluto, al igual que “ser un ordinal límite”, etc. A partir de aquí, fijado $\alpha \in \Omega^M$ una simple inducción prueba que $\bigwedge \beta \in \Omega^M \alpha \cdot^M \beta = \alpha\beta$.

El mismo razonamiento se aplica a la suma y a la exponentiación de ordinales.

Veamos ahora que la clausura transitiva es absoluta⁵ para modelos transitivos de ZF–AP. Para ello fijamos un modelo transitivo M de ZF–AP y observamos que lo siguiente es un teorema [TC 3.5] de ZF–AP:

$$\bigwedge x (\text{ct}_0 x = x \wedge \bigwedge n \in \omega \text{ ct}_{n+1} x = \bigcup \text{ct}_n x \wedge \text{ct } x = \bigcup_{n \in \omega} \text{ct}_n x).$$

Por lo tanto, se tiene que cumplir su relativización a M :

$$\bigwedge x \in M (\text{ct}_0^M x = x \wedge \bigwedge n \in \omega \text{ ct}_{n+1}^M x = \bigcup \text{ct}_n^M x \wedge \text{ct}^M x = \bigcup_{n \in \omega} \text{ct}_n^M x).$$

Ahora, fijado $x \in M$, una inducción trivial prueba que $\bigwedge n \in \omega \text{ ct}_n^M x = \text{ct}_n x$, y a su vez la última parte de la relativización implica que $\text{ct}^M x = \text{ct } x$.

Conceptos no absolutos en ZF En este último apartado trabajamos en ZF, y vamos a mostrar algunos ejemplos de expresiones que no son (necesariamente) absolutas para modelos transitivos M de ZF, para las cuales calcularemos sus relativizaciones. En el caso de los términos la técnica es la misma que hemos empleado en el apartado anterior: relativizar una fórmula adecuada que los caracterice:

- $\bigwedge x \in M (\mathcal{P}x)^M = \mathcal{P}x \cap M$.

En efecto, en ZF se demuestra que

$$\bigwedge xy (y \in \mathcal{P}x \leftrightarrow y \subset x),$$

luego se cumple su relativización a M , que es

$$\bigwedge xy \in M (y \in (\mathcal{P}x)^M \leftrightarrow y \subset x).$$

Esto equivale a

$$\bigwedge x \in M (\bigwedge y (y \in (\mathcal{P}x)^M \leftrightarrow y \in M \wedge y \subset x)).$$

Aquí hemos usado que $y \in (\mathcal{P}x)^M$ ya implica $y \in M$ por transitividad. Por lo tanto, concluimos que $\bigwedge x \in M (\mathcal{P}x)^M = \mathcal{P}x \cap M$.

- $\bigwedge \alpha \in \Omega^M V_\alpha^M = V_\alpha \cap M$.

⁵El argumento vale también para modelos de KP, pero en este caso tenemos que $\text{ct } x$ es Δ_1 respecto de KP [LM B.3].

En efecto, en ZF se demuestra que $\bigwedge \alpha x (x \in V_\alpha \leftrightarrow \text{rang } x < \alpha)$ y, como el rango es absoluto (hemos visto que es Δ_1), resulta que

$$\bigwedge x \in M \bigwedge \alpha \in \Omega^M (x \in V_\alpha^M \leftrightarrow \text{rang } x < \alpha),$$

luego

$$\bigwedge x \bigwedge \alpha \in \Omega^M (x \in V_\alpha^M \leftrightarrow x \in M \wedge \text{rang } x < \alpha),$$

de donde es inmediato que $V_\alpha^M = V_\alpha \cap M$.

- $\mathbb{R}^M = \mathbb{R} \cap M$.

En efecto, sabemos que $x \in \mathbb{R}$ es absoluto, luego, al relativizar la sentencia $\bigwedge x (x \in \mathbb{R} \leftrightarrow x \text{ es un número real})$ obtenemos

$$\bigwedge x \in M (x \in \mathbb{R}^M \leftrightarrow x \text{ es un número real}).$$

Por transitividad,

$$\bigwedge x (x \in \mathbb{R}^M \leftrightarrow x \in M \wedge x \text{ es un número real}),$$

que a su vez equivale a $\mathbb{R}^M = \mathbb{R} \cap M$.

- $\bigwedge AB \in M (A^B)^M = A^B \cap M$.

(La prueba es análoga a la del caso anterior).

- “ κ es un cardinal” es Π_1 respecto a ZF, por lo que es absoluto hacia abajo.
En efecto,

$$\kappa \text{ es un cardinal} \leftrightarrow \alpha \in \Omega \wedge \neg \bigvee \alpha f (\alpha \in \kappa \wedge f : \alpha \longrightarrow \kappa \text{ biyectiva}).$$

- “ x es numerable” es Σ_1 , por lo que es absoluto hacia arriba. En efecto:

$$x \text{ es numerable} \leftrightarrow \bigvee f y (y = \omega \wedge f : x \longrightarrow y \text{ inyectiva}).$$

Esto significa que cuando alguien que “vive” en un modelo transitivo M ve un cardinal, reconoce que lo es, pero en general puede tomar por cardinales a ordinales que no lo son realmente. Por el contrario, cuando afirma “ver” un conjunto numerable, es que el conjunto que “ve” es ciertamente numerable, pero puede tomar por conjuntos no numerables a conjuntos que en realidad son numerables. Pronto veremos ejemplos de estas situaciones.

Relativización de los axiomas de ZFC Puesto que vamos a tener que comprobar en muchas ocasiones que determinadas clases transitivas satisfacen los axiomas de ZFC, terminamos esta sección recordando a qué equivale concretamente la relativización de cada uno de ellos:

Extensionalidad El axioma de extensionalidad es

$$\Lambda xy(\Lambda u(u \in x \leftrightarrow u \in y) \rightarrow x = y),$$

y su relativización es

$$\Lambda xy \in M(\Lambda u(u \in x \leftrightarrow u \in y) \rightarrow x = y),$$

pues no es necesario poner $\Lambda u \in M$, ya que las condiciones $x \in M$ e $y \in M$ ya implican que $u \in M$. Concluimos que el axioma de extensionalidad se cumple en cualquier clase transitiva.

Regularidad Ya hemos probado (antes de la definición 2.9) que el axioma de regularidad se cumple también en cualquier clase transitiva.

Par El axioma del par es

$$\Lambda xy \vee z(\Lambda u(u \in z \leftrightarrow u = x \vee u = y)),$$

y su relativización es

$$\Lambda xy \in M \vee z \in M(\Lambda u(u \in z \leftrightarrow u = x \vee u = y)),$$

pues por transitividad es redundante exigir $\Lambda u \in M$, luego en definitiva equivale a $\Lambda xy \in M \{x, y\} \in M$.

Unión El axioma de la unión es

$$\Lambda x \vee y \Lambda u(u \in y \leftrightarrow \vee v(u \in v \wedge v \in x)),$$

y su relativización es

$$\Lambda x \in M \vee y \in M \Lambda u(u \in y \leftrightarrow \vee v(u \in v \wedge v \in x)),$$

que a su vez equivale a $\Lambda x \in M \bigcup x \in M$.

Reemplazo Para cada fórmula $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n)$, la relativización del caso correspondiente del axioma de reemplazo es

$$\begin{aligned} & \Lambda x_1 \cdots x_n \in M(\Lambda xyz \in M(\phi^M(x, y) \wedge \phi^M(x, z) \rightarrow y = z) \\ & \rightarrow \Lambda a \in M \vee b \in M \Lambda y \in M(y \in b \leftrightarrow \vee x \in a \phi^M(x, y)) \end{aligned}$$

Equivalentemente, bajo la hipótesis de unicidad sobre ϕ^M tiene que cumplirse que

$$\Lambda a \in M \{y \in M \mid \vee x \in a \phi^M(x, y)\} \in M.$$

Infinitud El axioma de infinitud es

$$\vee x(\emptyset \in x \wedge \Lambda u \in x u \cup \{u\} \in x).$$

Si una clase M es un modelo de B, todos los conceptos que aparecen en la fórmula anterior son absolutos para M , con lo que su relativización se reduce a

$$\bigvee x \in M (\emptyset \in x \wedge \bigwedge u \in x u \cup \{u\} \in x)$$

o, equivalentemente, a $\bigvee x \in M \omega \subset x$. Una condición suficiente para que se cumpla esto es $\omega \in M$ y si M es un modelo de KP, entonces la condición es necesaria, pues en KP puede definirse ω y es absoluto para modelos transitivos, luego tiene que ser $\omega = \omega^M \in M$.

Partes El axioma de partes es:

$$\bigwedge x \bigvee y \bigwedge u (u \in y \leftrightarrow u \subset x),$$

luego su relativización es

$$\bigwedge x \in M \bigvee y \in M \bigwedge u \in M (u \in y \leftrightarrow u \subset x).$$

Como $u \in y$ ya implica $u \in M$, esto equivale a

$$\bigwedge x \in M \bigvee y \in M \bigwedge u (u \in y \leftrightarrow u \subset x \wedge u \in M).$$

que a su vez equivale a $\bigwedge x \in M \mathcal{P}x \cap M \in M$.

Elección El axioma de elección es

$$\bigwedge x \bigvee f (f : x \longrightarrow \bigcup x \wedge \bigwedge u \in x (u \neq \emptyset \rightarrow f(u) \in u)).$$

Si M es un modelo de B, todos los conceptos que aparecen son absolutos, por lo que la relativización es

$$\bigwedge x \in M \bigvee f \in M f \text{ es una función de elección en } x.$$

Teniendo en cuenta que el axioma de elección equivale a que todo conjunto puede ser bien ordenado, es fácil ver que su relativización a un modelo M de ZF equivale a que, para todo $x \in M$, exista un buen orden R en x tal que $R \in M$ (aquí se usa que “ser un buen orden en x ” es una fórmula Δ_1 , luego es absoluta).

2.3 Los modelos V_λ

En esta sección trabajamos en ZFC y vamos a estudiar los conjuntos V_λ como modelos.

Notemos que para que un conjunto V_λ pueda ser un modelo de, al menos, la teoría básica B, se tiene que cumplir que λ sea un ordinal límite, pues tenemos que $\lambda = V_\lambda \cap \Omega = \Omega^{V_\lambda}$, y ya hemos probado que Ω^M tiene que ser un ordinal límite para todo modelo transitivo M de B.

En el caso de los conjuntos V_λ con $\lambda > \omega$ tenemos que cumplen todos los axiomas de ZFC salvo a lo sumo el esquema de reemplazo, pero en cualquier caso cumplen el esquema de especificación:

Teorema 2.12 Si λ es un ordinal límite, entonces V_λ es un modelo transitivo de la teoría de Zermelo Z, salvo el axioma de infinitud en el caso $\lambda = \omega$.

DEMOSTRACIÓN: Según hemos visto, V_λ , por ser transitivo, cumple los axiomas de extensionalidad y regularidad. También cumple el axioma del par, pues si $x, y \in V_\lambda$, entonces existe un $\delta < \lambda$ tal que $x, y \in V_\delta$, luego $\{x, y\} \subset V_\delta$, luego $\{x, y\} \in \mathcal{P}V_\delta = V_{\delta+1} \subset V_\lambda$.

Para probar el axioma de la unión observamos que si $x \in V_\lambda$ existe un $\delta < \lambda$ tal que $x \in V_\delta$, luego, por transitividad $\bigcup x \subset V_\delta$, luego $\bigcup x \in V_{\delta+1} \subset V_\lambda$.

El axioma de especificación para una fórmula $\phi(x, x_1, \dots, x_n)$ afirma que

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \bigwedge y \bigvee z \bigwedge x (x \in z \leftrightarrow x \in y \wedge \phi(x)),$$

cuya relativización es

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in V_\lambda \bigwedge y \in V_\lambda \bigvee z \in V_\lambda \bigwedge x (x \in z \leftrightarrow z \in y \wedge \phi^{V_\lambda}(x)).$$

Ahora bien, dados $x_1, \dots, x_n, y \in V_\lambda$, existe un $\delta < \lambda$ tal que $x_1, \dots, x_n, y \in V_\delta$, y el conjunto $z = \{x \in y \mid \phi^{V_\lambda}(x)\}$ cumple $z \subset y \subset V_\delta$, luego $z \in V_{\delta+1} \subset V_\lambda$, y claramente cumple lo pedido.

El axioma de infinitud se cumple si y sólo si $\omega \in V_\lambda$, lo cual equivale a que $\omega < \lambda$.

Para comprobar el axioma de partes tomamos $x \in V_\lambda$, con lo que existe un $\delta < \lambda$ tal que $x \in V_\delta$, y entonces todo $u \in \mathcal{P}x$ cumple $u \subset V_\delta$, luego $\mathcal{P}x \subset \mathcal{P}V_\delta = V_{\delta+1}$, luego $\mathcal{P}x \in V_{\delta+1} \subset V_\lambda$.

Notemos que si suponemos AE, entonces V_λ también cumple AE, pues si $x \in V_\lambda$, existe un $\delta < \lambda$ tal que $x \in V_\delta$, y si f es una función de elección en x , entonces por transitividad $f : x \rightarrow V_\delta$, luego todo $u \in f$ es de la forma $u = (p, q)$, con $p, q \in V_\delta$, luego $\{p\}, \{p, q\} \in V_{\delta+1}$, luego $(p, q) \in V_{\delta+1}$, luego $f \in V_{\delta+3} \subset V_\lambda$. ■

Nota Como Z tiene infinitos axiomas, en principio, la conclusión $V_\lambda \models Z$ del teorema anterior tiene que verse como un esquema teoremático, en el sentido de que, para cada axioma α de Z se prueba que $V_\lambda \models \alpha$. Sin embargo, como V_λ es un conjunto, podemos considerarlo como modelo de Z en el sentido de la teoría de modelos, y entonces podemos probar que $V_\lambda \models Z$ entendiendo que $Z \subset \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$ es el conjunto de todos los axiomas de Z.

En efecto, sólo hay que probar que si $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$ entonces V_λ cumple el caso correspondiente del axioma de especificación, es decir, que

$$V_\lambda \models \bigwedge x_1 \cdots x_n \bigwedge y \bigvee z \bigwedge x (x \in z \leftrightarrow x \in y \wedge \phi(x)).$$

Esto equivale a que, fijados $x_1, \dots, x_n, y \in V_\lambda$, existe un $z \in V_\lambda$ tal que

$$\bigwedge x (x \in z \leftrightarrow x \in y \wedge V_\lambda \models \phi[x, x_1, \dots, x_n]),$$

y basta tomar $z = \{x \in y \mid V_\lambda \models \phi[x, x_1, \dots, x_n]\}$. Como en el teorema anterior se prueba que $z \in V_\lambda$ y cumple lo requerido. ■

En cuanto al axioma de reemplazo, se cumple lo siguiente:

Teorema 2.13 (AE) *Si κ es un cardinal inaccesible, entonces $V_\kappa \models \text{ZFC}$ (en el sentido de la teoría de modelos).*

DEMOSTRACIÓN: Sólo falta probar que V_κ cumple el axioma de reemplazo. Para ello tomamos $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ y tenemos que probar que

$$\begin{aligned} V_\kappa \models \bigwedge_{x_1 \dots x_n} (\bigwedge_{x y z} (\phi(x, y) \wedge \phi(x, z) \rightarrow y = z) \rightarrow \\ \bigwedge_a \bigvee b \bigwedge_y (y \in b \leftrightarrow \bigvee x \in a \phi(x, y))). \end{aligned}$$

Esto equivale a que, fijados $a_1, \dots, a_n \in V_\kappa$, bajo el supuesto de que

$$\bigwedge_{u v w} \in V_\kappa (V_\kappa \models \phi[u, v] \wedge V_\kappa \models \phi[u, w] \rightarrow v = w)$$

se cumple también que

$$\bigwedge_{c \in V_\kappa} \bigvee_{d \in V_\kappa} \bigwedge_{v \in V_\kappa} (v \in d \leftrightarrow \bigvee_{u \in c} V_\kappa \models \phi[u, v]).$$

Tomamos $c \in V_\kappa$, llamamos $A = \{u \in c \mid \bigvee_{v \in V_\kappa} V_\kappa \models \phi[u, v]\} \subset c$ y consideramos la función $F : A \longrightarrow V_\kappa$ que a cada $u \in A$ le asigna el único $v \in V_\kappa$ tal que $V_\kappa \models \phi[u, v]$.

Tenemos que $|A| \leq |c| < \kappa$ (por [TC 5.27]). Sea $G : A \longrightarrow \kappa$ la función que a cada $u \in A$ le asigna el mínimo ordinal $\delta < \kappa$ tal que $F(u) \in V_\delta$. Como κ es regular, el conjunto $G[A]$ tiene que estar acotado en κ (pues $|G[A]| \leq |A| < \kappa$). Sea, pues, $\delta < \kappa$ tal que $G[A] \subset \delta$ o, equivalentemente, tal que $F[A] \subset V_\delta$. Entonces $d = F[A] \in V_{\delta+1} \subset V_\kappa$ y claramente cumple lo requerido. ■

Nota El mismo argumento del teorema anterior prueba que $V_\omega \models \text{ZFC} - \text{AI}$.

Enseguida veremos que la condición de que κ sea inaccesible no es necesaria en el teorema anterior, pero antes destacamos la consecuencia más relevante:

$$\vdash_{\text{ZFC}} (\bigvee_{\kappa} \kappa \text{ es inaccesible} \rightarrow \text{Cosis ZFC}).$$

El teorema de incompletitud de Gödel implica entonces que si ZFC es consistente no es posible demostrar en ZFC la existencia de cardinales inaccesibles, pero en realidad podemos concluir esto mismo directamente a partir del teorema anterior. Para ello necesitamos observar que para los modelos V_λ casi todo es absoluto:

Teorema 2.14 *Las expresiones siguientes son absolutas para todo modelo V_λ tal que $V_\lambda \models \text{ZFC}$:*

a) $\mathcal{P}x$

- b) κ es un cardinal.
- c) La aritmética cardinal $\kappa + \mu$, $\kappa\mu$, κ^μ .
- d) $\text{cf } \kappa$
- e) κ es un cardinal límite, sucesor, regular, singular, débilmente inaccesible, fuertemente inaccesible.

No es necesario entender la hipótesis $V_\lambda \models \text{ZFC}$ en el sentido de la teoría de modelos, sino que basta suponer que existe un conjunto finito Γ de axiomas (metamatemáticos) de ZFC tal que si $V_\lambda \models \Gamma$ entonces las expresiones indicadas son absolutas.

DEMOSTRACIÓN: a) en la prueba de 2.12 hemos visto que si $x \in V_\lambda$ entonces $\mathcal{P}x \in V_\lambda$, luego $\mathcal{P}^{V_\lambda}x = \mathcal{P}x \cap V_\lambda = \mathcal{P}x$, luego $\mathcal{P}x$ es absoluto para V_λ .

b) Si $\kappa \in V_\lambda$ es un cardinal $^{V_\lambda}$, esto significa que $\kappa \in \Omega$ y

$$\neg \forall f \alpha \in V_\lambda (\alpha < \kappa \wedge f : \alpha \longrightarrow \kappa \text{ biyectiva}).$$

Ahora bien, si existe $\alpha < \kappa$ y $f : \alpha \longrightarrow \kappa$ biyectiva, podemos tomar $\delta < \lambda$ tal que $\alpha, \kappa \in V_\delta$, con lo que $f \subset \alpha \times \kappa \subset V_{\delta+2}$ y $f \in V_{\delta+3} \subset V_\lambda$, contradicción, luego κ es un cardinal. La implicación contraria es trivial, pues ser un cardinal es Π_1 .

c) El carácter absoluto de la suma y el producto de cardinales es trivial (en el caso finito lo es porque coinciden con las operaciones ordinales, que son absolutas, y en el caso infinito es inmediato). En cuanto a la exponentiación, observemos en primer lugar que A^B es absoluto, es decir, que si $A, B \in V_\lambda$, entonces $(A^B)^{V_\lambda} = A^B$. En efecto, como en ZFC se prueba que

$$\bigwedge AB f(f \in A^B \leftrightarrow f : B \longrightarrow A),$$

al relativizar queda:

$$\bigwedge AB f \in V_\lambda (f \in (A^B)^{V_\lambda} \leftrightarrow f : B \longrightarrow A),$$

pero si $A, B \in V_\lambda$ y $f : B \longrightarrow A$, entonces $f \in V_\lambda$, pues podemos tomar un $\delta < \lambda$ tal que $A, B \in V_\delta$, de modo que $f \subset A \times B \subset V_{\delta+2}$ y $f \in V_{\delta+3} \subset V_\lambda$, luego la sentencia anterior equivale a

$$\bigwedge AB \in V_\lambda \bigwedge f (f \in (A^B)^{V_\lambda} \leftrightarrow f : B \longrightarrow A),$$

luego $\bigwedge AB \in V_\lambda (A^B)^{V_\lambda} = A^B$.

Ahora, si $\kappa, \mu \in V_\lambda$ son cardinales, relativizando

$$\bigwedge \kappa \mu (\kappa^\mu \text{ es un cardinal} \wedge \bigvee f (f : \kappa^\mu \longrightarrow {}^\mu \kappa \text{ biyectiva}))$$

obtenemos que

$$\bigwedge \kappa \mu \in V_\lambda ((\kappa^\mu)^{V_\lambda} \text{ es un cardinal} \wedge \bigvee f \in V_\lambda (f : (\kappa^\mu)^{V_\lambda} \longrightarrow {}^\mu \kappa \text{ biyectiva})),$$

luego $(\kappa^\mu)^{V_\lambda} = |{}^\mu \kappa| = \kappa^\mu$.

d) Si $\kappa \in V_\lambda$ es un ordinal límite y $f : \text{cf } \kappa \longrightarrow \kappa$ es cofinal, por el argumento usual concluimos que $f \in V_\lambda$, y es fácil ver que “ser cofinal” es Δ_0 , por lo que $f : \text{cf } \kappa \longrightarrow \kappa$ es cofinal V_λ , luego $\text{cf}^{V_\lambda} \kappa \leq \text{cf } \kappa$.

Por otra parte, relativizando $\bigwedge \kappa \bigvee f (f : \text{cf } \kappa \longrightarrow \kappa \text{ cofinal})$, obtenemos que $\bigvee f \in V_\lambda f : (\text{cf}^{V_\lambda} \kappa \longrightarrow \kappa \text{ cofinal})$, luego $\text{cf } \kappa \leq \text{cf}^{V_\lambda} \kappa$ y tenemos la igualdad.

e) es consecuencia inmediata de los apartados precedentes. ■

Ahora podemos razonar como sigue: supongamos que en ZFC pudiera demostrarse que existe un cardinal inaccesible. Entonces, razonando en ZFC, podríamos considerar el mínimo cardinal inaccesible κ , y podríamos considerar el modelo V_κ , que sabemos que cumple $V_\kappa \models \text{ZFC}$, luego tendría que cumplirse

$$V_\kappa \models \bigvee \mu \mu \text{ es inaccesible},$$

pero, por el teorema anterior, esto equivale a $\bigvee \mu < \kappa \mu$ es inaccesible, en contradicción con la minimalidad de κ . En definitiva, hemos mostrado explícitamente cómo a partir de una demostración de la existencia de un cardinal inaccesible en ZFC puede probarse una contradicción en ZFC.

En otras palabras, tenemos que si ZFC es consistente también lo es ZFC más la no existencia de cardinales inaccesibles, y la razón de fondo es que los cardinales inaccesibles son innecesarios para que se cumplan los axiomas de ZFC, en el sentido de que si tomamos el menor de ellos κ y nos quedamos únicamente con los conjuntos de V_κ , los conjuntos que nos quedan siguen cumpliendo todos los axiomas de ZFC, y κ pasa a ser ahora la clase Ω de todos los ordinales.

Cabe preguntarse ahora si, partiendo siempre del supuesto de que ZFC es consistente, al igual que hemos probado que es consistente suponer que no existen cardinales inaccesibles, también es posible demostrar que es consistente suponer que sí existen.

La respuesta es negativa, pero es muy importante entender que no estamos afirmando que no sea consistente suponer que existen cardinales inaccesibles, sino que, en caso de que sea consistente, es imposible demostrar que así es.

En efecto, nos estamos planteando si es posible dar un argumento matemático que nos convenza sin lugar a dudas de que si ZFC es consistente, entonces ZFC + FI también es consistente, donde abreviamos con FI la existencia de un cardinal inaccesible. Ahora bien, cualquier argumento que convenza a un matemático puede formalizarse en ZFC, luego en tal caso tendríamos que

$$\underset{\text{ZFC}}{\vdash} \text{Consis ZFC} \rightarrow \text{Consis}(\text{ZFC} + \text{FI}).$$

Pero sabemos que

$$\underset{\text{ZFC+FI}}{\vdash} \text{Consis ZFC},$$

luego uniendo ambas afirmaciones tendríamos que

$$\underset{\text{ZFC+FI}}{\vdash} \text{Consis}(\text{ZFC} + \text{FI}),$$

pero el segundo teorema de incompletitud de Gödel implica entonces que la teoría ZFC+FI es contradictoria y, si nuestro supuesto argumento de que la consistencia de ZFC implica la de ZFC+FI fuera realmente válido, esto significaría que ZFC también sería contradictorio.

Ahora bien, el hecho de que no podamos probar que ZFC + FI es consistente (ni siquiera suponiendo que ZFC es consistente) no es motivo para que sospechemos que probablemente ZFC + FI sea contradictorio. En general, aunque Consis ZFC no pueda probarse en ZFC, no es raro encontrar sentencias que impliquen Consis ZFC (la sentencia FI es una entre muchas), y a todas ellas se les puede aplicar literalmente el argumento anterior que nos asegura que es imposible demostrar su consistencia incluso suponiendo la de ZFC. Ciertamente, tomar como axioma una de estas sentencias puede volver contradictoria la teoría, pero el mero hecho de que una sentencia implique Consis ZFC no es razón para recelar de ella.

Por ejemplo, el caso más simple de tales sentencias es la propia Consis ZFC. Tenemos las mismas razones para dudar de la consistencia de ZFC + FI que para dudar de la consistencia de ZFC+Consis ZFC (en ambos casos, lo único que sabemos es que tal consistencia no puede probarse, y en ambos casos exactamente por el mismo argumento), pero si ZFC es consistente, entonces, aunque no podamos demostrarlo, lo “razonable” es conjeturar que ZFC + Consis ZFC también es consistente.⁶

Podemos pensar en FI como en un axioma análogo al axioma de infinitud AI. Notemos que si \aleph_0 no es un cardinal inaccesible es simplemente porque en la definición de estos cardinales hemos exigido que sean no numerables. Si elimináramos esta condición de la definición entonces AI sería equivalente a la existencia de un cardinal inaccesible, mientras que FI sería equivalente a la existencia de al menos dos cardinales inaccesibles (el menor de los cuales sería \aleph_0 y el siguiente sería lo que realmente entendemos por cardinal inaccesible). Así pues, suponer FI puede verse como forzar a que el universo de ZFC sea mucho mayor del que realmente es necesario para que se cumplan todos los resultados que los matemáticos saben justificar mediante razonamientos “convictantes”. Quizá el lector se pregunte qué interés puede haber en ello, y la respuesta es que, aunque los conjuntos desorbitadamente grandes puedan no ser muy interesantes en sí mismos, que su existencia sea consistente sí lo es.

Tomemos por ejemplo la hipótesis de Kurepa [TC 9.23]. Veremos que si ZFC es consistente entonces ZFC + HK también lo es. En cambio, $\neg HK$ es una de las muchas sentencias que implican Consis ZFC, por lo que estamos en las mismas: no es posible demostrar la consistencia de ZFC + $\neg HK$ ni siquiera suponiendo que ZFC es consistente. No obstante, veremos que ZFC + FI es consistente si y sólo si lo es ZFC + $\neg HK$.

La diferencia es que, *a priori*, no hay ninguna razón por la que podamos considerar plausible que no sea posible demostrar en ZFC la existencia de un árbol de Kurepa. En cambio, una vez probada la equivalencia que acabamos de

⁶Aunque podría no serlo. Eso significaría que ZFC es consistente, pero no ω -consistente, y en todos sus modelos habría números naturales infinitos.

indicar, ya podemos considerarlo plausible: si se pudiera probar que no existen árboles de Kurepa, se podría probar que no existen cardinales inaccesibles, y esto sí que no es nada plausible.

En general, cuando nos planteamos el problema de demostrar la consistencia de una teoría T (como $ZFC + \neg HK$) debemos contemplar la posibilidad de que no sea suficiente suponer la consistencia de ZFC. Esto sucederá si T permite probar Consis ZFC , en cuyo caso, tendremos que suponer la consistencia de alguna teoría más fuerte cuya consistencia podamos considerar plausible, como por ejemplo $ZFC + FI$, pero si, por ejemplo, la teoría T permite probar $\text{Consis}(ZFC + FI)$, entonces suponer la consistencia $ZFC + FI$ no será suficiente para demostrar la consistencia de T , y tendremos que recurrir a teorías más fuertes cuya consistencia consideremos plausible.

Así pues, si queremos llegar lejos obteniendo pruebas de consistencia, necesitamos contar con una “escala” lo más amplia posible de teorías cuya consistencia consideremos plausible y que nos sirvan de referencia para reducir a la consistencia de alguna de ellas la consistencia de cualquier otra teoría. Algunas teorías de dicha escala son:

$$\text{ZFC}, \quad \text{ZFC} + \text{Consis ZFC}, \quad \text{ZFC} + FI, \quad \text{ZFC} + FI_2, \quad \dots$$

donde FI_2 es el axioma que afirma la existencia de dos cardinales inaccesibles.

Notemos que a partir de FI no puede demostrarse la existencia de un segundo cardinal inaccesible, pues si así fuera, razonando en la teoría $ZFC + FI$ podríamos considerar el mínimo cardinal inaccesible κ y el segundo menor cardinal inaccesible μ , pero entonces tendríamos que $V_\mu \models ZFC + FI$, y como en esta teoría se puede, supuestamente, demostrar que existen dos cardinales inaccesibles, debería existir en V_μ otro cardinal $\kappa' < \mu$ inaccesible aparte de κ , y así habría dos cardinales inaccesibles bajo μ , en contra de la definición de μ . (Aquí usamos que ser inaccesible en V_μ es lo mismo que ser inaccesible.)

Por consiguiente, FI_2 es más fuerte que FI y, más aún, la consistencia de $ZFC + FI_2$ no puede probarse ni siquiera suponiendo la de $ZFC + FI$, pues entonces tendríamos

$$\vdash_{ZFC} \text{Consis ZFC} + FI \rightarrow \text{Consis ZFC} + FI_2,$$

y como $\vdash_{ZFC+FI_2} \text{Consis ZFC} + FI$, concluiríamos que $\vdash_{ZFC+FI_2} \text{Consis ZFC} + FI_2$ y por el segundo teorema de incompletitud resultaría que la teoría $ZFC + FI_2$ sería contradictoria.

Es claro entonces que nuestra escala de referencia puede prolongarse con las teorías $ZFC + FI_3$, $ZFC + FI_4$, etc., donde FI_n afirma la existencia de al menos n cardinales inaccesibles. Sin embargo, muchas pruebas de consistencia requieren comparar con teorías muchísimo más fuertes que éstas.

Veamos ahora que no es necesario que λ sea un cardinal inaccesible para que V_λ pueda ser un modelo de ZFC:

Teorema 2.15 Si κ es un cardinal regular no numerable, el conjunto

$$\{\alpha < \kappa \mid V_\alpha \prec V_\kappa\}$$

es cerrado no acotado en κ .

DEMOSTRACIÓN: Recordemos el teorema [TC 11.22], que proporciona una condición sencilla para que V_α sea un submodelo elemental del V_κ , a saber, que para toda $\phi(x, x_1, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L})$ se cumpla

$$\bigwedge a_1 \cdots a_n \in V_\alpha (\forall a \in V_\kappa V_\kappa \models \phi[a, a_1, \dots, a_n] \rightarrow \forall a \in V_\alpha V_\kappa \models \phi[a, a_1, \dots, a_n]).$$

Es fácil ver entonces que el conjunto C del enunciado es cerrado, pues si $\lambda < \kappa$ cumple que $C \cap \lambda$ no está acotado en λ , entonces, dados $a_1, \dots, a_n \in V_\lambda$, podemos tomar un $\alpha \in C \cap \lambda$ tal que $a_1, \dots, a_n \in V_\alpha$, y entonces, si

$$\forall a \in V_\lambda V_\kappa \models \phi[a, a_1, \dots, a_n],$$

también $\forall a \in V_\lambda V_\lambda \models \phi[a, a_1, \dots, a_n]$, luego $\forall a \in V_\lambda V_\kappa \models \phi[a, a_1, \dots, a_n]$, lo que prueba que $\lambda \in C$.

Para probar que no está acotado, para cada fórmula ϕ con $n + 1$ variables libres, consideramos la función $h_\phi : V_\kappa^n \longrightarrow \kappa$ que a cada $(a_1, \dots, a_n) \in V_\kappa^n$ le asigna el mínimo $\delta < \kappa$ tal que $\forall a \in V_\delta V_\kappa \models \phi[a, a_1, \dots, a_n]$ si existe tal δ y 0 en caso contrario.

Si $\alpha < \kappa$ cumple $h^{[n]\alpha} \subset \alpha$ para toda fórmula $\phi(x, x_1, \dots, x_n)$, entonces es claro que V_α cumple la condición de [TC 11.22], luego $V_\alpha \prec V_\kappa$ y $\alpha \in C$, pero el conjunto de tales α es c.n.a. por [TC 6.7], luego C contiene un c.n.a. y, por consiguiente, no está acotado. ■

En particular (razonando en ZFC), si existe un cardinal inaccesible, podemos tomar el mínimo de todos ellos, digamos κ , y entonces $V_\kappa \models \text{ZFC}$, y si $C \subset \kappa$ es el c.n.a. dado por el teorema anterior, todo $\lambda \in C$ es un ordinal (necesariamente límite) tal que $V_\lambda \models \text{ZFC}$ sin que λ sea un cardinal inaccesible.

Nota Observemos que la fórmula $V_\alpha \models \text{ZFC}$ es absoluta para modelos V_λ de ZFC, pues el término V_α lo es, ya que $V_\alpha^{V_\lambda} = V_\alpha \cap V_\lambda = V_\alpha$ y la fórmula $M \models \text{ZFC}$ es absoluta porque es Δ_1 .

Por lo tanto, si κ es inaccesible, entonces V_κ es un modelo de ZFC más la existencia de una cantidad no acotada de ordinales α tales que $V_\alpha \models \text{ZFC}$.

En particular, si llamamos $M_1 \equiv \bigvee \alpha V_\alpha \models \text{ZFC}$, tenemos que

$$\vdash_{\text{ZFC+FI}} \text{Consis}(\text{ZFC} + M_1), \quad \vdash_{\text{ZFC+M}_1} \text{Consis}(\text{ZFC}),$$

y el argumento usual nos da que no podemos probar la consistencia de la teoría $\text{ZFC} + M_1$ ni siquiera suponiendo la de ZFC, ni podemos demostrar la consistencia de $\text{ZFC} + \text{FI}$ ni siquiera suponiendo la de $\text{ZFC} + M_1$.

Naturalmente, entre $\text{ZFC} + M_1$ y $\text{ZFC} + \text{FI}$ podemos intercalar infinitas teorías intermedias, como $\text{ZFC} + M_2$, donde M_2 afirma la existencia de al

menos dos ordinales $\alpha < \beta$ tales que V_α y V_β son modelos de ZFC, o incluso $ZFC + M_\omega$, donde M_ω afirma la existencia de una sucesión creciente $\{\alpha_n\}_{n \in \omega}$ tal que $\bigwedge n \in \omega V_{\alpha_n} \models ZFC$, etc. ■

La idea del teorema 2.15 puede aplicarse a la clase universal V en lugar de V_κ , aunque esto obliga a considerar fórmulas metamatemáticas y a restringirnos a un conjunto finito de ellas. El resultado es el teorema de reflexión, para cuya prueba remitimos a [LM 12.29]:

Teorema 2.16 (Teorema de Reflexión) *Si ϕ_1, \dots, ϕ_r son fórmulas de \mathcal{L}_{tc} , entonces, para todo ordinal α existe un ordinal límite $\lambda > \alpha$ tal que las fórmulas dadas son absolutas para V_λ .*

Como consecuencia, en ZF (resp. ZFC) puede probarse que existen ordinales λ tales que $V_\lambda \models ZF$ (resp. $V_\lambda \models ZFC$), entendiendo esto en el sentido débil de que, para cada conjunto finito de axiomas de ZF o ZFC es posible demostrar que existe un λ para el que V_λ cumple dichos axiomas. Esto es más fuerte de lo que uno podría pensar en un principio, pues hay que tener en cuenta que, aunque ZFC tiene infinitos axiomas. todos los teoremas demostrados hasta la fecha en la historia de la humanidad son un número finito y requieren, por tanto, un número finito de axiomas para ser demostrados. Así pues, puede probarse que existen modelos V_λ que son prácticamente indistinguibles de modelos de todo ZFC.

Otra consecuencia del teorema anterior [LM 12.31] es que ZFC (si es consistente) no es finitamente axiomatizable.

2.4 Colapsos transitivos

Toda la teoría que estamos desarrollando está orientada a trabajar con modelos transitivos. Sin embargo, algunas de las técnicas que proporcionan modelos (como los submodelos dados por el teorema de Löwenheim-Skolem o la formación de ultrapotencias) no garantizan que los modelos obtenidos sean transitivos o, a veces, siquiera naturales. Por ello vamos a estudiar ahora en qué condiciones podemos pasar de un modelo arbitrario (M, R) a un modelo transitivo isomorfo.

Recordemos de [TC 11.17] la definición de isomorfismo de modelos, que en el caso de modelos de \mathcal{L}_{tc} se reduce a la siguiente (allí está definida para conjuntos, pero la podemos generalizar trivialmente a clases propias):

Definición 2.17 Dadas dos clases A y B con relaciones $R \subset A \times A$ y $S \subset B \times B$, diremos que $G : (A, R) \longrightarrow (B, S)$ es un *isomorfismo de modelos* de \mathcal{L}_{tc} si $G : A \longrightarrow B$ biyectiva y $\bigwedge xy \in A (x R y \leftrightarrow G(x) S G(y))$.

El teorema [TC 11.19] prueba que si tenemos un isomorfismo de modelos entre dos conjuntos, entonces, para toda fórmula $\phi(x_1, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$ y todos los $a_1, \dots, a_n \in A$, se cumple

$$(A, R) \models \phi[a_1, \dots, a_n] \leftrightarrow (B, S) \models \phi[G(a_1), \dots, G(a_n)].$$

Una inducción rutinaria prueba la versión metamatemática de este resultado, válida para clases cualesquiera (y demostrable en la teoría básica B):

Teorema 2.18 (B) *Si $G : (A, R) \rightarrow (B, S)$ es un isomorfismo de modelos, para toda fórmula (metamatemática) sin descriptores $\phi(x_1, \dots, x_n)$ de \mathcal{L}_{tc} se cumple*

$$\bigwedge a_1 \cdots a_n \in A(\phi^{AR}(a_1, \dots, a_n) \leftrightarrow \phi^{BS}(G(a_1), \dots, G(a_n))).$$

DEMOSTRACIÓN: Razonamos por inducción sobre la longitud de una expresión θ . Si $\theta \equiv x$ es trivial (se reduce a $G(a) = G(a)$).

Si $\theta \equiv x = y$ es consecuencia inmediata de que G es biyectiva.

Si $\theta \equiv x \in y$ es consecuencia inmediata de la definición de isomorfismo.

Si vale para ϕ , trivialmente vale también para $\neg\phi$, y es fácil ver que si vale para ϕ y ψ vale para $\phi \rightarrow \psi$. Veamos con detalle el caso de $\bigwedge x \phi(x, x_1, \dots, x_n)$ bajo la hipótesis de inducción de que el resultado vale para ϕ , es decir, suponemos que

$$\bigwedge aa_1 \cdots a_n \in A(\phi^{AR}(a, a_1, \dots, a_n) \leftrightarrow \phi^{BS}(G(a), G(a_1), \dots, G(a_n))),$$

pero es claro que esto implica que

$$\begin{aligned} \bigwedge a_1 \cdots a_n &\in A(\bigwedge x \in A \phi^{AR}(x, a_1, \dots, a_n) \\ &\leftrightarrow \bigwedge x \in A \phi^{BS}(G(x), G(a_1), \dots, G(a_n))), \end{aligned}$$

y usando de nuevo que G es biyectiva esto equivale a

$$\begin{aligned} \bigwedge a_1 \cdots a_n &\in A(\bigwedge x \in A \phi^{AR}(x, a_1, \dots, a_n) \\ &\leftrightarrow \bigwedge x \in B \phi^{BS}(x, G(a_1), \dots, G(a_n))), \end{aligned}$$

que es lo mismo que

$$\bigwedge a_1 \cdots a_n \in A((\bigwedge x \phi)^{AR}(a_1, \dots, a_n) \leftrightarrow (\bigwedge x \phi)^{BS}(G(a_1), \dots, G(a_n))).$$

■

En particular, dos modelos isomorfos satisfacen las mismas sentencias.

Según indicábamos, queremos estudiar en qué condiciones un modelo arbitrario (A, R) es isomorfo a un modelo transitivo M . Observemos que la condición de isomorfismo se reduce entonces a

$$\bigwedge xy \in A(x R y \leftrightarrow G(x) \in G(y)).$$

Los resultados que exponemos a continuación son demostrables en ZF*. Vamos a apoyarnos en el teorema general de recursión transfinita [TC 3.9], que permite definir una función por recurrencia sobre una clase A en la que hay definida una relación R a la que hay que exigir dos propiedades:

- a) Que sea conjuntista, es decir, que para todo $x \in A$, la extensión

$$e_A(x) = \{u \in A \mid u R x\}$$

sea un conjunto. Esta propiedad se cumple trivialmente si A es un conjunto.

- b) Que R esté bien fundada, es decir, que todo conjunto $x \subset A$ no vacío tiene un R -minimal, un $u \in x$ tal que $e_A(u) \cap x = \emptyset$.

En estas condiciones,⁷ el teorema de recursión afirma que para definir una función sobre A basta definirla en cada $x \in A$ supuesto que ya esté definida sobre su extensión $e_A(x)$. Este resultado justifica la definición siguiente:

Definición 2.19 Sea R una relación conjuntista y bien fundada en una clase A . Llamaremos *función colapsante de Mostowski* a la función $G_A^R : M \rightarrow V$ dada por

$$G_A^R(x) = \{G_A^R(y) \mid y \in A \wedge y R x\}.$$

Así pues, $G_A^R(x)$ es el conjunto de las imágenes por G_A^R de los elementos de la extensión $e_A(x)$.

Definimos el *colapso transitivo* de A como el rango de G_A^R , y lo representaremos por M_A^R , de modo que $G_A^R : A \rightarrow M_A^R$ suprayectiva.

Teorema 2.20 Sea R una relación conjuntista y bien fundada en una clase A . Entonces M_A^R es una clase transitiva y bien fundada y

$$\bigwedge xy \in A (x R y \rightarrow G_A^R(x) \in G_A^R(y)).$$

DEMOSTRACIÓN: La última afirmación es consecuencia inmediata de la definición de G . Respecto a la transitividad, tomemos $u \in v \in M_A^R$. Entonces $v = G_A^R(x)$, para cierto $x \in A$, luego $u = G_A^R(y)$, para cierto $y \in A$ tal que $y R x$. Por consiguiente $u \in M_A^R$.

Veamos ahora que M_A^R está bien fundada. Tomamos $x \subset M_A^R$, $x \neq \emptyset$. Entonces $(G_A^R)^{-1}[x]$ es un subconjunto no vacío de A , luego tiene un R -minimal y . Veamos que $G_A^R(y)$ es un minimal de x , es decir, que $x \cap G_A^R(y) = \emptyset$. En efecto, si $u \in x \cap G_A^R(y)$, entonces $u = G_A^R(v)$, para un cierto $v \in A$ tal que $v R y$. Entonces $v \in (G_A^R)^{-1}[x]$, luego contradice la minimalidad de y . ■

En general, la función colapsante no es inyectiva, pero lo es si añadimos una condición obviamente necesaria:

Definición 2.21 Una relación R es *extensional* sobre una clase A si

$$\bigwedge xy \in A (\bigwedge u \in A (u R x \leftrightarrow u R y) \rightarrow x = y).$$

⁷En realidad, para probar el teorema de recursión bajo estas hipótesis es necesario suponer el axioma de infinitud. No obstante, dicho axioma es innecesario si, en lugar de exigir que la relación R sea conjuntista, exigimos que sea clausurable [LM 11.31]. Bajo AI ambas propiedades son equivalentes [LM 11.34], pero la propiedad de ser clausurable permite probar el teorema de recursión sin AI [LM 11.38]

En otras palabras, R es extensional si el modelo (A, R) cumple el axioma de extensionalidad. Es claro que la relación de pertenencia es extensional en cualquier clase transitiva.

Teorema 2.22 *Sea R una relación conjuntista, extensional y bien fundada en una clase A . Entonces $G_A^R : A \rightarrow M_A^R$ biyectiva y*

$$\bigwedge xy \in A (x R y \leftrightarrow G_A^R(x) \in G_A^R(y)).$$

DEMOSTRACIÓN: Si G_A^R no fuera inyectiva podríamos tomar un R -minimal x de la clase

$$B = \{x \in A \mid \bigvee y \in A (x \neq y \wedge G_A^R(x) = G_A^R(y))\}.$$

Entonces existe un $y \in A$ tal que $y \neq x$ y $G_A^R(x) = G_A^R(y)$. Como R es extensional, existe un $z \in A$ tal que

$$(z R x \wedge \neg z R y) \vee (z R y \wedge \neg z R x).$$

Si $z R x \wedge \neg z R y$, entonces $G_A^R(z) \in G_A^R(x) = G_A^R(y)$, luego, por definición de $G_A^R(y)$, ha de ser $G_A^R(z) = G_A^R(w)$, para cierto $w \in A$, con $w R y$. Además, como $\neg z R y$, ha de ser $w \neq z$, o sea, $z \in B \wedge z R x$, contradicción.

Si $z R y \wedge \neg z R x$, entonces $G_A^R(z) \in G_A^R(y) = G_A^R(x)$, luego $G_A^R(z) = G_A^R(w)$, con $w \in A$, $w R x$, luego en particular $w \neq z$. Por consiguiente $w \in B$ contradice la minimalidad de x .

Con esto tenemos la biyectividad. Finalmente, si $G_A^R(x) \in G_A^R(y)$, ha de ser $G_A^R(x) = G_A^R(u)$, para cierto $u \in A$, $u R y$. Como G_A^R es biyectiva, ha de ser $x = u$, luego $u R y$. ■

Finalmente probamos la unicidad tanto del colapso transitivo como de la función colapsante:

Teorema 2.23 (Teorema del colapso de Mostowski) *Si R es una relación conjuntista, bien fundada y extensional en una clase A , existe una única clase transitiva M y una única aplicación $G : A \rightarrow M$ biyectiva tal que*

$$\bigwedge xy \in A (x R y \leftrightarrow G(x) \in G(y)).$$

DEMOSTRACIÓN: Sólo falta probar la unicidad. Ahora bien, si G y M cumplen estas propiedades, se ha de cumplir que

$$\bigwedge x \in A G(x) = \{G(y) \mid y \in A \wedge y R x\}.$$

En efecto, si $u \in G(x) \in M$, por transitividad $u \in M$, luego $u = G(y)$, para cierto $y \in A$. Entonces $G(y) \in G(x)$, luego $y R x$. La otra inclusión es inmediata.

Por consiguiente G es la función colapsante (por la unicidad de su definición recurrente) y M ha de ser el colapso transitivo. ■

Observaciones Este teorema generaliza al hecho de que todo conjunto bien ordenado es semejante a un ordinal, pues si (A, \leq) es un conjunto bien ordenado, entonces la relación $<$ es claramente extensional y bien fundada en A (y trivialmente conjuntista, porque A es un conjunto), y entonces el colapso transitivo es un conjunto transitivo totalmente ordenado por la relación de pertenencia, luego es un ordinal.

En términos de modelos de \mathcal{L}_{tc} , el teorema anterior proporciona condiciones necesarias y suficientes para que un modelo (A, R) sea isomorfo a un modelo transitivo M . Como ya hemos observado, la extensionalidad equivale a que (A, R) satisfaga el axioma de extensionalidad. Sin embargo, en contra de lo que podría pensarse a primera vista, la buena fundación no es equivalente a que (A, R) satisfaga el axioma de regularidad. En efecto, el axioma de regularidad es

$$\bigwedge x(x \neq \emptyset \rightarrow \bigvee u \in x u \cap x = \emptyset)$$

y su relativización es

$$\bigwedge x \in A(\bigvee u \in A u R x \rightarrow \bigvee u \in A(u R x \wedge \bigwedge v \in A(v R x \rightarrow \neg v R u)))$$

o, equivalentemente,

$$\bigwedge x \in A(e_A(x) \neq \emptyset \rightarrow \bigvee u \in e_A(x) e_A(u) \cap e_A(x) = \emptyset),$$

mientras que la buena fundación de R es

$$\bigwedge x \subset A(x \neq \emptyset \rightarrow \bigvee u \in x e_A(u) \cap x = \emptyset).$$

Así pues, la buena fundación requiere que todo $x \subset A$ no vacío tenga un R -minimal, mientras que el axioma de regularidad en A sólo garantiza que todo $x \subset A$ no vacío que sea la extensión de un elemento de A tiene R -minimal.

Admitiendo el axioma de regularidad, la relación de pertenencia está bien fundada en toda clase, luego⁸ todo modelo natural de cualquier teoría de conjuntos que incluya el axioma de extensionalidad es isomorfo a un modelo transitivo. ■

Modelos transitivos numerables Como aplicación del teorema del colapso de Mostowski podemos mostrar la existencia de modelos transitivos numerables de ZFC:

Teorema 2.24 (Teorema de Reflexión) (ZFC) *Si Γ es un conjunto finito de sentencias (metamatemáticas) de \mathcal{L}_{tc} , existe un modelo transitivo numerable M de ZFC tal que las sentencias de Γ son absolutas para M .*

⁸Si no suponemos el axioma de infinitud necesitamos además que la relación de pertenencia sea clausurable, es decir, que todo conjunto tenga clausura transitiva. Esto sucede si suponemos, de hecho, que todo conjunto es regular.

DEMOSTRACIÓN: El enunciado debe entenderse como que M satisface cualquier conjunto finito prefijado de axiomas de ZFC. Añadimos a Γ todos los axiomas de ZFC que queremos que cumpla M (pero sólo un número finito de ellos) y, para cada sentencia γ de Γ , tomamos una sentencia γ' sin descriptores que sea equivalente a γ . Sea Γ' el conjunto de todas las sentencias γ' .

Por el teorema de reflexión 2.16 sabemos que existe un modelo de la forma $N = V_\lambda$ tal que las sentencias de Γ' son absolutas para N . Por el teorema de Löwenheim-Skolem [TC 11.25] N admite un submodelo elemental numerable $S \prec N$. El modelo S no es necesariamente transitivo, pero sigue siendo un modelo natural (su relación de pertenencia es la pertenencia usual), luego, según hemos observado justo antes de este teorema, tiene un colapso transitivo M , que es un modelo transitivo numerable isomorfo a S .

De este modo, si γ es cualquier sentencia de Γ y γ' es su sentencia sin descriptores equivalente en Γ' , tenemos que⁹

$$\gamma \leftrightarrow \gamma' \leftrightarrow \gamma'^N \leftrightarrow N \models \gamma' \leftrightarrow S \models \gamma' \leftrightarrow M \models \gamma' \leftrightarrow \gamma'^M \leftrightarrow \gamma^M,$$

luego todas las sentencias de Γ son absolutas para M y, en particular, los axiomas de ZFC que hemos incluido en Γ se cumplen en M , luego $M \models \text{ZFC}$. ■

Nota Una variante del teorema anterior consiste en suponer que existe un cardinal inaccesible κ , en cuyo caso todo el razonamiento puede aplicarse partiendo de $N = V_\kappa$ y el resultado es que existe un conjunto transitivo numerable que cumple $M \models \text{ZFC}$ en el sentido de la teoría de modelos, es decir, que satisface todos los axiomas de ZFC. ■

Vemos así que basta una cantidad numerable M de conjuntos para “engaños” a un matemático y hacerle creer que tales conjuntos son todos los conjuntos. Naturalmente, esto supone que en M habrá conjuntos numerables que serán no numerables^M, como $\mathcal{P}^M\omega = \mathcal{P}\omega \cap M$ o como \aleph_{19}^M , que será un cierto ordinal numerable.

Colapsos transitivos en KP Terminamos la sección con algunas observaciones sobre el teorema del colapso de Mostowski en la teoría KP.

El teorema general de recursión transfinita no puede probarse en KP, ni siquiera el teorema del colapso de Mostowski. De hecho, ni siquiera puede probarse que todo conjunto bien ordenado sea semejante a un ordinal. Para comprender dónde está el problema demostraremos el teorema del colapso añadiendo a KP la hipótesis necesaria para que la prueba natural funcione:

Teorema 2.25 (KP+Π₁-especificación) *Si (A, R) es un conjunto con una relación extensional y bien fundada, entonces (A, R) es isomorfo a un conjunto transitivo.*

⁹Si γ tiene descriptores, la equivalencia $\gamma'^M \leftrightarrow \gamma^M$ requiere que M contenga al conjunto vacío, pero podemos suponer que Γ contiene la sentencia $\bigvee x \bigwedge u u \notin x$ y para ella vale la cadena de equivalencias, que nos da que $\emptyset \in M$.

DEMOSTRACIÓN: Llamamos *aproximaciones* a las aplicaciones $f : B \rightarrow V$ tales que

$$B \subset A \wedge \bigwedge a \in A \bigwedge b \in B (a R b \rightarrow a \in B)$$

$$\wedge \bigwedge b \in B f(b) = \{f(a) \mid a \in B \wedge a R b\}$$

Es fácil ver que la fórmula “ $f : \mathcal{D}f \rightarrow V$ es una aproximación” es Δ_0 . Si f y g son aproximaciones y $X = \mathcal{D}f \cap \mathcal{D}g$, existe el conjunto $\{x \in X \mid f(x) \neq g(x)\}$, y es fácil ver que tiene que ser vacío (la existencia de un R -minimal lleva a contradicción), de modo que dos aproximaciones coinciden en su dominio común.

Ahora aplicamos Π_1 -especificación para definir el conjunto

$$Y = \{a \in A \mid \neg \bigvee f (f \text{ es una aproximación} \wedge a \in \mathcal{D}f)\}.$$

Si no es vacío, tiene un R -minimal a , de modo que, si $A_a = \{b \in A \mid b R a\}$,

$$\bigwedge b \in A_a \bigvee f(f \text{ es una aproximación} \wedge b \in \mathcal{D}f).$$

Por Σ_1 -recolección existe un conjunto Y de aproximaciones tal que cada elemento de A_a está en el dominio de un elemento de Y . Por la unicidad de las aproximaciones, $f = \bigcup Y$ es también una aproximación cuyo dominio es A . Si llamamos $M = \mathcal{R}f$, tenemos que $f : A \rightarrow M$ suprayectiva y

$$\bigwedge a \in A f(a) = \{f(b) \mid b \in A \wedge b R a\}.$$

Es obvio que M es un conjunto transitivo y f es biyectiva, pues esto equivale a que el conjunto

$$C = \{a \in A \mid \bigvee b \in A (b \neq a \wedge f(a) = f(b))\}$$

sea no vacío. Si no lo fuera, tendría un R -minimal a , para el cual existiría un $b \neq a$ tal que $f(a) = f(b)$, pero entonces, si $x R a$, entonces $f(x) \in f(a) = f(b)$, luego existe un $y R b$ tal que $f(x) = f(y)$, pero por minimalidad $x = y R b$. Recíprocamente, si $x R b$, entonces $f(x) \in f(b) = f(a)$, luego existe un $y R a$ tal que $f(x) = f(y)$, y de nuevo por minimalidad $x = y R a$. Por consiguiente, a y b tienen la misma extensión, luego $a = b$ porque R es extensional, contradicción.

Ahora es inmediato que $\bigwedge ab \in A (a R b \leftrightarrow f(a) = f(b))$. Con esto hemos probado que $f : (A, R) \rightarrow M$ es una función colapsante (un isomorfismo). ■

En KP podemos demostrar un caso particular:

Teorema 2.26 (KP) *Sea (A, R) un conjunto con una relación extensional y bien fundada y supongamos que existe un ordinal θ y una aplicación $r : A \rightarrow \theta$ tal que $\bigwedge xy \in A (x R y \rightarrow r(x) < r(y))$. Entonces (A, R) es isomorfo a un conjunto transitivo.*

DEMOSTRACIÓN: Para cada ordinal $\alpha \leq \theta$, definimos

$$A_\alpha = \{a \in A \mid r(a) < \alpha\}.$$

Llamemos

$$\phi(\alpha, f) \equiv \alpha \in \Omega \wedge \alpha \leq \theta \wedge f : A_\alpha \longrightarrow V \wedge \bigwedge a \in A_\alpha f(a) = \{f(x) \mid x R a\}.$$

Se trata de una fórmula Δ_0 . Por ejemplo, la última parte equivale a

$$\bigwedge u \in f \bigvee v \in u \bigvee a \in v (u = (a, z) \wedge \bigwedge y \in z \bigvee x \in A (x R a \wedge y = f(x)) \wedge$$

$$\bigwedge x \in A (x R a \rightarrow \bigvee y \in z y = f(x))).$$

Veamos que $\phi(\alpha, f) \wedge \phi(\alpha, f') \rightarrow f = f'$. En efecto, en caso contrario podemos considerar el conjunto no vacío

$$B = \{a \in A_\alpha \mid f(a) \neq f'(a)\},$$

el cual tendrá un R -minimal $a \in B$, de modo que si $x R a$, entonces $f(x) = f'(x)$, pero entonces

$$f(a) = \{f(x) \mid x R a\} = \{f'(x) \mid x R a\} = f'(a),$$

contradicción.

Ahora probamos por Σ_1 -inducción que $\bigwedge \alpha \leq \theta \bigvee f \phi(\alpha, f)$. Más precisamente, consideramos la fórmula

$$\psi(\alpha) \equiv (\alpha \in \Omega \wedge \alpha \leq \theta \wedge \bigvee f \phi(\alpha, f)) \vee \neg(\alpha \in \Omega \wedge \alpha \leq \theta).$$

Suponemos que $\alpha \leq \theta$ y que $\bigwedge \beta < \alpha \bigvee f \phi(\beta, f)$. Por la unicidad que hemos probado, tenemos de hecho que $\bigwedge \beta < \alpha \bigvee^1 f \phi(\beta, f)$.

Si $\alpha = 0$, es obvio que $\phi(\alpha, \emptyset)$.

Si $\alpha = \beta + 1$, sea $f : A_\beta \longrightarrow V$ tal que $\phi(\beta, f)$. Es fácil ver que la fórmula

$$y = f[A_a^R]$$

es Δ_0 , luego por reemplazo existe $h : \{a \in A \mid r(a) = \beta\} \longrightarrow y$ suprayectiva tal que $h(a) = f[A_a^R] = \{f(x) \mid x R a\}$, y es fácil ver que $f' = f \cup h$ cumple $\phi(\alpha, f')$.

Si α es un ordinal límite, por Σ_1 -reemplazo existe $h : \alpha \longrightarrow y$ suprayectiva tal que $\bigwedge \beta < \alpha \phi(\beta, h(\beta))$, y es fácil ver que $f = \bigcup y$ cumple $\phi(\alpha, f)$.

En particular, hemos probado que existe una f tal que $\phi(\theta, f)$, es decir, tal que $f : A \longrightarrow M$ suprayectiva, para cierto conjunto $M = f[A]$ y tal que

$$\bigwedge a \in A f(a) = \{f(x) \mid x R a\}.$$

A partir de aquí la prueba concluye igual que la del teorema anterior. ■

En particular, dado cualquier conjunto A , por Σ_1 -reemplazo existe un ordinal θ tal que $\text{rang} : A \longrightarrow \theta$, luego todo conjunto A sobre el que la relación de pertenencia sea extensional es isomorfo a un conjunto transitivo.

2.5 Los modelos $H(\kappa)$

Presentamos aquí unos conjuntos cuyo comportamiento como modelos es algo mejor que el de los modelos V_λ que ya hemos estudiado. Trabajaremos en ZFC.

Definición 2.27 Si κ es un cardinal infinito, llamamos

$$H(\kappa) = \{x \mid |\text{ct } x| < \kappa\}.$$

No es inmediato que $H(\kappa)$ sea un conjunto, pero lo cierto es que sí que lo es:

Teorema 2.28 Si κ es un cardinal infinito, entonces $H(\kappa) \subset V_\kappa$.

DEMOSTRACIÓN: Si $x \in H(\kappa)$, entonces $|\text{ct } x| < \kappa$. El teorema [LM 11.43] implica que la imagen de $\text{ct } x$ por la aplicación rango es transitiva, luego es un ordinal α . Además $|\alpha| \leq |\text{ct } x| < \kappa$, luego $\alpha < \kappa$. En particular, como $x \subset \text{ct } x$, tenemos que todo elemento de x tiene rango $< \alpha$, luego $x \subset V_\alpha$, luego $x \in V_{\alpha+1} \subset V_\kappa$. ■

Se suele decir que los elementos de $H(\kappa)$ son los conjuntos de cardinal hereditariamente menor que κ , pero esto sólo es exacto cuando κ es regular. En efecto, en general, se dice que un conjunto x tiene *hereditariamente* una propiedad si la tienen todos los elementos de $\text{ct } x \cup \{x\}$ (es decir, si la tiene x , y los elementos de x , y los elementos de los elementos de x , etc.). Y en nuestro caso se cumple lo siguiente:

Teorema 2.29 Si κ es un cardinal regular, entonces $x \in H(\kappa)$ si y sólo si todos los elementos de $\text{ct } x \cup \{x\}$ tienen cardinal $< \kappa$.

DEMOSTRACIÓN: Si $x \in H(\kappa)$, todo $u \in \text{ct } x \cup \{x\}$ cumple $u \subset \text{ct } x \cup \{x\}$, luego $|u| \leq |\text{ct } x| + 1 < \kappa$.

Recíprocamente, si x cumple la condición del enunciado, vamos a probar por \in -inducción que todo $u \in \text{ct } x \cup \{x\}$ cumple $|\text{ct } u| < \kappa$. En efecto, si vale para todo $v \in u$, tenemos que

$$\text{ct } u = u \cup \bigcup_{v \in u} \text{ct } v,$$

donde $|\text{ct } v| < \kappa$ por hipótesis de inducción y $|u| < \kappa$ por la hipótesis, luego la regularidad de κ implica que la unión tiene cardinal $< \kappa$, luego también $|\text{ct } u| < \kappa$, y en particular $|\text{ct } x| < \kappa$, es decir, que $x \in H(\kappa)$. ■

Por el contrario, si κ es singular y $x \subset \kappa$ es un conjunto no acotado tal que $|x| < \kappa$, entonces $\text{ct } x = \kappa$, luego todo elemento de $\text{ct } x \cup \{x\}$ tiene cardinal $< \kappa$, pero $x \notin H(\kappa)$.

En particular, $H(\aleph_0)$ es el conjunto de todos los conjuntos *hereditariamente finitos*, $H(\aleph_1)$ es el conjunto de todos los conjuntos *hereditariamente numerables*, etc.

Una caracterización más útil que la dada por el teorema anterior es la siguiente:

Teorema 2.30 Si κ es un cardinal regular, entonces $x \in H(\kappa)$ si y sólo si $x \subset H(\kappa)$ y $|x| < \kappa$.

DEMOSTRACIÓN: Si $x \in H(\kappa)$, entonces $|x| \leq |\text{ct } x| < \kappa$ y si $u \in \text{ct } x$ entonces $\text{ct } u \subset \text{ct } x$, luego $|\text{ct } u| < \kappa$, luego $u \in H(\kappa)$.

Para probar el recíproco observamos que, por la parte ya probada, todo elemento de $H(\kappa)$ tiene cardinal $< \kappa$, luego si se da la hipótesis del enunciado se cumple la del teorema anterior y $x \in H(\kappa)$. ■

Notemos que la implicación $x \in H(\kappa) \rightarrow x \subset H(\kappa) \wedge |x| < \kappa$ no requiere la regularidad de κ , luego tenemos que todos los conjuntos $H(\kappa)$ son transitivos.

La inclusión del teorema 2.28 no es en general una igualdad:

Teorema 2.31 Si κ es un cardinal infinito, $H(\kappa) = V_\kappa$ si y sólo si $\kappa = \beth_\kappa$.

DEMOSTRACIÓN: Es fácil ver que $H(\aleph_0) = V_\omega$, así que podemos restringirnos al caso en que κ es no numerable. La clave está en que $|V_{\omega+\alpha}| = \beth_\alpha$ ([TC 5.26]), de modo que si $\kappa = \beth_\kappa$ y $x \in V_\kappa$, entonces existe un $\alpha < \kappa$ tal que $x \in V_\alpha$, luego $\text{ct}(x) \subset V_\alpha$, luego $|\text{ct}(x)| \leq |V_\alpha| \leq |V_{\omega+\alpha}| = \beth_\alpha < \beth_\kappa = \kappa$, luego $x \in H(\kappa)$.

Recíprocamente, si $H(\kappa) = V_\kappa$ entonces, para todo $\alpha < \kappa$, tenemos que $\omega + \alpha < \kappa$ y, como $V_{\omega+\alpha} \in V_\kappa = H(\kappa)$, tenemos que $\beth_\alpha < \kappa$, luego $\beth_\kappa \leq \kappa$, y la desigualdad opuesta se da siempre. ■

Para $\kappa > \aleph_0$ sabemos que $|V_\kappa| = \beth_\kappa$. Calculamos ahora el cardinal de $H(\kappa)$:

Teorema 2.32 Si κ es un cardinal infinito, entonces $|H(\kappa)| = 2^{<\kappa}$.

DEMOSTRACIÓN: Si $\mu < \kappa$, entonces $\mathcal{P}\mu \subset H(\kappa)$, pues si $x \subset \mu$ entonces $\text{ct } x \subset \mu$, luego $|\text{ct } x| \leq \mu < \kappa$, luego $x \in H(\kappa)$. Por lo tanto $2^\mu \leq |H(\kappa)|$, luego $2^{<\kappa} \leq |H(\kappa)|$.

Para probar la desigualdad opuesta, para cada $\mu < \kappa$, consideramos el conjunto A_μ de todas las relaciones $E \subset \mu \times \mu$ extensionales y bien fundadas en μ . Obviamente $|A_\mu| \leq |\mathcal{P}(\mu \times \mu)| = 2^\mu \leq 2^{<\kappa}$.

Para cada $E \in A_\mu$, sea x_E el colapso transitivo de (μ, R_E) . Puesto que $|\text{ct } x_E| = |x_E| = \mu < \kappa$, tenemos que $x_E \in H(\kappa)$.

Recíprocamente, para cada $x \in H(\kappa)$ transitivo, llamando $\mu = |x|$, tenemos una biyección $f : \mu \longrightarrow x$ y podemos definir una relación E en μ mediante $\alpha E \beta \leftrightarrow f(\alpha) \in f(\beta)$. Por la unicidad del colapso transitivo, es claro entonces que x es el colapso transitivo de (μ, x) , de modo que $x = x_E$. En otras palabras, la aplicación

$$\bigcup_{\mu < \kappa} \{\mu\} \times A_\mu \longrightarrow H(\kappa)$$

que a cada (μ, E) le asigna x_E tiene por imagen el conjunto T de todos los conjuntos transitivos de $H(\kappa)$. Por consiguiente

$$|T| \leq \left| \bigcup_{\mu < \kappa} \{\mu\} \times A_\mu \right| \leq \kappa 2^{<\kappa} = 2^{<\kappa}.$$

Por último, si $u \in H(\kappa)$, el conjunto $x = \text{ct } u \cup \{u\}$ es transitivo y claramente $|x| < \kappa$, luego $x \in H(\kappa)$, luego $x \in T$. Por lo tanto

$$|H(\kappa)| = |\bigcup T| \leq |T|\kappa \leq 2^{<\kappa} \kappa = 2^{<\kappa},$$

puesto que todo elemento de T tiene cardinal menor que κ . ■

Pasemos ya a estudiar los conjuntos $H(\kappa)$ como modelos. El resultado principal es el siguiente:

Teorema 2.33 *Si κ es un cardinal no numerable, entonces $H(\kappa)$ es un modelo transitivo de KPI+AE y, si κ es regular, también de ZFC – AP.*

DEMOSTRACIÓN: Claramente, $H(\kappa)$ cumple el axioma de extensionalidad porque es un conjunto transitivo. Si $x, y \in H(\kappa)$, entonces

$$\text{ct}(\{x, y\}) = \text{ct } x \cup \text{ct } y \cup \{x, y\},$$

y es claro entonces que $|\text{ct}(\{x, y\})| < \kappa$, luego $\{x, y\} \in H(\kappa)$, y esto prueba el axioma del par. Similarmente, como $\text{ct}(\bigcup x) \subset \text{ct } x$, también $\bigcup x \in H(\kappa)$ y se cumple el axioma de la unión.

Observemos ahora que $H(\kappa)$ cumple el esquema de especificación completo (no sólo para fórmulas Δ_0). En efecto, dada $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L})$ con variables libres u, x_1, \dots, x_n , si $x, x_1, \dots, x_n \in H(\kappa)$, el conjunto

$$A = \{u \in x \mid H(\kappa) \models \phi[u, x_1, \dots, x_n]\}$$

cumple $A \in H(\kappa)$ porque $\text{ct } A \subset \text{ct } x$, luego $|\text{ct } A| < \kappa$. Esto prueba el esquema de especificación.

Por transitividad, $H(\kappa)$ cumple el axioma de regularidad de ZFC, pero también cumple el de KP, pues, dada una fórmula $\phi(u, x_1, \dots, x_n)$, se trata de probar que si $x_1, \dots, x_n \in H(\kappa)$ entonces

$$\forall u \in H(\kappa) \ H(\kappa) \models \phi[u, x_1, \dots, x_n] \rightarrow$$

$$\forall u \in H(\kappa) \ (H(\kappa) \models \phi[u, x_1, \dots, x_n] \wedge \bigwedge v \in u \neg H(\kappa) \models \phi[v, x_1, \dots, x_n]),$$

pero basta tomar un $u \in H(\kappa)$ que cumpla $H(\kappa) \models \phi[u, x_1, \dots, x_n]$ y que tenga rango mínimo.

Puesto que $\omega \in H(\kappa)$ (éste es el único punto en el que la prueba requiere que κ sea no numerable), tenemos el axioma de infinitud, y para el axioma de elección observamos que si $x \in H(\kappa)$ y $R \subset x \times x$ es un buen orden en x , se prueba sin dificultad que $R \in H(\kappa)$.

Así, para probar que $H(\kappa)$ cumple KPI sólo falta probar el esquema de Δ_0 -colección y para probar que cumple ZFC–AP sólo falta probar el esquema de reemplazo. Probaremos primero ambos axiomas suponiendo que κ es regular.

Para el reemplazo tomamos $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L})$, suponemos que

$$\bigwedge xyz \in H(\kappa) (H(\kappa) \models \phi[x, y] \wedge H(\kappa) \models \phi[x, z] \rightarrow y = z)$$

y fijamos un conjunto $A \in H(\kappa)$. Basta probar que el conjunto

$$B = \{y \in H(\kappa) \mid \bigvee x \in A H(\kappa) \models \phi[x, y]\}$$

cumple $B \in H(\kappa)$. Por 2.30 basta probar que $|B| < \kappa$, pero claramente

$$f = \{(x, y) \in A \times B \mid H(\kappa) \models \phi[x, y]\}$$

es una aplicación $f : A_0 \longrightarrow B$ suprayectiva, donde

$$A_0 = \{x \in A \mid \bigvee y \in B H(\kappa) \models \phi[x, y]\},$$

luego $|B| \leq |A_0| \leq |A| < \kappa$.

Para probar el esquema de Δ_0 -recolección tomamos $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L})$ de clase Δ_0 y un conjunto $x \in H(\kappa)$ de modo que

$$\bigwedge u \in x \bigvee v \in H(\kappa) H(\kappa) \models \phi[u, v].$$

Por AE existe una aplicación suprayectiva $f : x \longrightarrow y \subset H(\kappa)$ tal que

$$\bigwedge u \in x H(\kappa) \models \phi[u, f(u)],$$

luego, en particular, $\bigwedge u \in x \bigvee v \in y H(\kappa) \models \phi[u, v]$. Finalmente basta observar que $|y| \leq |x| < \kappa$, luego $y \in H(\kappa)$.

Nos falta demostrar el esquema de Δ_0 -recolección cuando κ es singular. Empezamos demostrando un hecho general:

Si $\mu < \kappa$ son cardinales no numerables, $\phi(x_1, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L})$ es una fórmula Σ_1 y $x_1, \dots, x_n \in H(\mu)$, entonces

$$H(\kappa) \models \phi[x_1, \dots, x_n] \rightarrow H(\mu) \models \phi[x_1, \dots, x_n].$$

En efecto, tenemos que $\{(x_1, \dots, x_n)\} \in H(\mu)$, luego $W = \text{ct}(\{x_1, \dots, x_n\})$ cumple $|W| < \mu$. Además $W \subset H(\mu) \subset H(\kappa)$. Por el teorema de Löwenheim-Skolem [TC 11.24] podemos tomar un submodelo elemental $M \prec H(\kappa)$ tal que $W \subset M$ y $|M| = \aleph_0 |W| < \mu$. Sea $\pi : M \longrightarrow N$ el colapso transitivo de M . Entonces $|N| = |M| < \mu$, luego $N \in H(\mu)$ y $N \subset H(\mu)$.

Si llamamos $i = \pi^{-1}$, tenemos que $i : N \longrightarrow H(\kappa)$ es una inmersión elemental tal que $i|_W$ es la identidad (se comprueba por \in -inducción en W). Por lo tanto,

$$H(\kappa) \models \phi[x_1, \dots, x_n] \rightarrow H(\kappa) \models \phi[i(x_1), \dots, i(x_n)] \rightarrow N \models \phi[x_1, \dots, x_n],$$

pero ϕ es de la forma $\phi = \bigvee x \psi$, donde ψ es Δ_0 y lo que tenemos es que $\bigvee x \in N N \models \psi[x, x_1, \dots, x_n]$. Como ψ es Δ_0 es absoluta, luego

$$\bigvee x \in H(\mu) H(\mu) \models \psi[x, x_1, \dots, x_n],$$

luego $H(\mu) \models \phi[x_1, \dots, x_n]$, como había que probar.

Para probar que $H(\kappa)$ cumple el axioma de Δ_0 -recolección tomamos una fórmula $\psi(u, v, x_1, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L})$ de clase Δ_0 y fijamos unos conjuntos $x_1, \dots, x_n, x \in H(\kappa)$ tales que

$$\bigwedge u \in x \bigvee v \in H(\kappa) H(\kappa) \models \psi[u, v, x_1, \dots, x_n].$$

Entonces $\{(x, x_1, \dots, x_n)\} \in H(\kappa)$, luego $W = \text{ct}(\{(x, x_1, \dots, x_n)\})$ cumple $|W| < \kappa$. Como κ es singular, existe un cardinal regular $\mu < \kappa$ tal que $|W| < \mu$ y $x, x_1, \dots, x_n \in H(\mu)$, con lo que $W \subset H(\mu)$.

Fijado $u \in x$, el resultado que hemos probado aplicado a la fórmula $\phi \equiv \bigvee v \psi$ nos da que

$$\bigvee v \in H(\mu) H(\mu) \models \phi[u, v, x_1, \dots, x_n].$$

De este modo tenemos que

$$\bigwedge u \in x \bigvee v \in H(\mu) H(\mu) \models \phi[u, v, x_1, \dots, x_n].$$

Como μ es regular, tenemos probado que $H(\mu)$ es un modelo de KP, luego, por el axioma de Δ_0 -recolección en $H(\mu)$ tenemos que

$$\bigvee y \in H(\mu) \bigwedge u \in x \bigvee v \in y H(\mu) \models \phi[u, v, x_1, \dots, x_n].$$

Como ϕ es Δ_0 , esto implica que

$$\bigvee y \in H(\kappa) \bigwedge u \in x \bigvee v \in y H(\kappa) \models \phi[u, v, x_1, \dots, x_n],$$

que es lo que había que probar. ■

En cuanto al axioma de partes, la situación es la siguiente:

Teorema 2.34 *Si κ es un cardinal, el modelo $H(\kappa)$ cumple el axioma de partes si y sólo si κ es un cardinal límite fuerte.*

DEMOSTRACIÓN: Que $H(\kappa)$ cumpla el axioma de partes equivale a que para todo $x \in H(\kappa)$ se cumpla $\mathcal{P}x \cap H(\kappa) \in H(\kappa)$. Ahora bien, es inmediato que si $x \in H(\kappa)$ entonces $\mathcal{P}x \subset H(\kappa)$, luego la condición es que $\mathcal{P}x \in H(\kappa)$.

Así pues, si $H(\kappa)$ cumple el axioma de partes y $\mu < \kappa$, entonces $\mu \in H(\kappa)$, luego $\mathcal{P}\mu \in H(\kappa)$, luego $2^\mu = |\mathcal{P}\mu| < \kappa$, pues $|x| < \kappa$. Por lo tanto $\mathcal{P}x \in H(\kappa)$. ■

Recíprocamente, si κ es un límite fuerte y $x \in H(\kappa)$, entonces se cumple que $|\text{ct } \mathcal{P}x| = |\mathcal{P}x| = 2^{|x|} < \kappa$, pues $|x| < \kappa$. Por lo tanto $\mathcal{P}x \in H(\kappa)$. ■

Los dos teoremas anteriores nos dan que si κ es un cardinal inaccesible entonces $H(\kappa) \models \text{ZFC}$ (cosa que ya sabíamos indirectamente porque en tal caso $H(\kappa) = V_\kappa$). También hemos visto que $H(\aleph_0) \models \text{ZFC - AI}$.

2.6 La parte bien fundada de un modelo

En esta sección trabajamos en ZF y consideramos un modelo (M, R) de KP. Si M es una clase propia esto debe entenderse como que todos los teoremas que vamos a probar se cumplirán si (M, R) satisface una cantidad finita suficientemente grande de axiomas de KP, mientras que si M es un conjunto podemos suponer, alternativamente, que $(M, R) \models \text{KP}$ en el sentido de la teoría de modelos.

Como KP incluye el axioma de extensionalidad, en particular tenemos que la relación R es extensional en M y, en caso de que M sea una clase propia, supondremos también que es conjuntista, es decir, que para cada $a \in M$, la extensión

$$e_M(a) = \{b \in M \mid b R a\}$$

es un conjunto. En cambio, no suponemos que R este bien fundada. Lo que vamos a probar es que en M podemos distinguir una “parte bien fundada” susceptible de ser colapsada a un modelo transitivo.

Puesto que en KP se demuestra que todo conjunto tiene clausura transitiva, podemos definir $\text{ct}_M : M \rightarrow \mathcal{P}M$ dada por

$$\text{ct}_M(x) = e_M(\text{ct}^{MR}(x)).$$

Observemos que si M es una clase propia $\text{ct}_M(x)$ es un conjunto porque estamos suponiendo que R es conjuntista. En caso contrario ct no estaría bien definida. Además, como

$$(M, R) \models \bigwedge x \text{ ct } x \text{ es transitiva}$$

se cumple que si $u R v \wedge v \in \text{ct}_M(a)$, entonces $u \in \text{ct}_M(a)$. Igualmente, como

$$(M, R) \models \bigwedge x \text{ ct } x = x \cup \bigcup_{u \in x} \text{ct } u,$$

resulta que

$$\text{ct}_M(a) = e_M(a) \cup \bigcup_{u \in e_M(a)} \text{ct}_M(u).$$

Diremos que $a \in M$ está *bien fundado* si la relación R está bien fundada en $\text{ct}_M(a)$. Llamaremos $\overline{M}_{bf} \subset M$ al conjunto de los elementos bien fundados de M .

Observemos que R está bien fundada en \overline{M}_{bf} :

Si $X \subset \overline{M}_{bf}$ es un subconjunto no vacío, tomamos $a \in X$ y consideramos $Y = X \cap \text{ct}_M(a)$. Si $Y = \emptyset$, entonces a es un R -minimal de X , y en caso contrario Y tiene un R -minimal b , que también es un R -minimal de X , pues si existe $u \in X \cap e_M(b)$ entonces $u R b \in \text{ct}_M(a)$, luego $u \in \text{ct}_M(a)$, luego $u \in Y \cap e_M(b)$, contradicción. ■

Conviene caracterizar como sigue los elementos de \overline{M}_{bf} :

Si $x \in M$, las afirmaciones siguientes son equivalentes:

- a) $x \in \bar{M}_{\text{bf}}$,
- b) $e_M(x) \subset \bar{M}_{\text{bf}}$,
- c) $\text{ct}_M(x) \subset \bar{M}_{\text{bf}}$.

Si se cumplen estas afirmaciones, $e_M(x) = e_{\bar{M}_{\text{bf}}}(x)$.

En efecto: a) \Rightarrow b) Si $u \in e_M(x)$, entonces $\text{ct}_M(u) \subset \text{ct}_M(x)$ y, como R está bien fundada en $\text{ct}_M(x)$, también lo está en $\text{ct}_M(u)$, luego $u \in \bar{M}_{\text{bf}}$ y en particular $u \in e_{\bar{M}_{\text{bf}}}(x)$. Con esto hemos probado que $e_M(x) \subset e_{\bar{M}_{\text{bf}}}(x)$, y la inclusión opuesta es obvia.

b) \Rightarrow c) Si $u \in e_M(x)$, tenemos que R está bien fundada en $\text{ct}_M(u)$, luego si $v \in \text{ct}_M(u)$, como $\text{ct}_M(v) \subset \text{ct}_M(u)$, resulta que R también está bien fundada en $\text{ct}_M(v)$, luego $v \in \bar{M}_{\text{bf}}$, luego $\text{ct}_M(u) \subset \bar{M}_{\text{bf}}$, luego

$$\text{ct}_M(x) = e_M(x) \cup \bigcup_{u \in e_M(x)} \text{ct}_M(u) \subset \bar{M}_{\text{bf}}.$$

c) \Rightarrow a) Como R está bien fundada en \bar{M}_{bf} , también lo está en $\text{ct}_M(x)$, luego $x \in \bar{M}_{\text{bf}}$. ■

Resulta, pues, que R es una relación extensional, conjuntista y bien fundada sobre \bar{M}_{bf} , lo que nos permite formar su colapso transitivo:

Definición 2.35 En las condiciones anteriores, llamaremos *parte bien fundada* de M al colapso transitivo M_{bf} de \bar{M}_{bf} . Llamaremos $i : M_{\text{bf}} \rightarrow M$ a la inversa de la función colapsante.

Así $i : M_{\text{bf}} \rightarrow (\bar{M}_{\text{bf}}, R)$ es un isomorfismo de modelos. Si la consideramos como aplicación en M , entonces es claro que es inyectiva y que

$$\bigwedge uv \in M_{\text{bf}} (u \in v \leftrightarrow i(u) R i(v)).$$

Expresaremos esto diciendo que i es una inmersión de modelos. Si M (y por consiguiente M_{bf}) es un conjunto, entonces i es ciertamente una inmersión (no necesariamente elemental) en el sentido de [TC 11.17].

Observemos ahora que i es Δ_0 -elemental, en el sentido de que si $\phi(x_1, \dots, x_n)$ es una fórmula Δ_0 , entonces

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in M_{\text{bf}} (\phi^{M_{\text{bf}}}(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \phi^{MR}(i(x_1), \dots, i(x_n))).$$

En efecto, lo que sabemos en principio es que $\phi^{M_{\text{bf}}}(x_1, \dots, x_n)$ es equivalente a $\phi^{\bar{M}_{\text{bf}}R}(i(x_1), \dots, i(x_n))$, y basta probar que (para fórmulas Δ_0) se cumple

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in \bar{M}_{\text{bf}} (\phi^{\bar{M}_{\text{bf}}R}(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \phi^{MR}(x_1, \dots, x_n)).$$

En efecto, si $\phi \equiv x = y$ o $\phi \equiv x \in y$ es trivial, si vale para ϕ y ψ , es fácil ver que vale para $\neg\phi$ y $\phi \rightarrow \psi$. El único caso no trivial se da cuando $\phi \equiv \bigwedge x \in x_i \psi(x, x_1, \dots, x_n)$. Por hipótesis de inducción

$$\bigwedge xx_1 \cdots x_n \in \bar{M}_{\text{bf}} (\psi^{\bar{M}_{\text{bf}}R}(x, x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \psi^{MR}(x, x_1, \dots, x_n)),$$

de donde

$$\begin{aligned} \bigwedge x_1 \cdots x_n \in \overline{M}_{\text{bf}} (\bigwedge x \in \overline{M}_{\text{bf}} (x R x_i \rightarrow \psi^{\overline{M}_{\text{bf}} R}(x, x_1, \dots, x_n))) \\ \leftrightarrow \bigwedge x \in \overline{M}_{\text{bf}} (x R x_i \rightarrow \psi^{MR}(x, x_1, \dots, x_n))). \end{aligned}$$

Ahora bien, si $x \in M$ cumple $x R x_i$, es decir, $x \in e_M(x_i)$, con $x_i \in \overline{M}_{\text{bf}}$, entonces $x \in \overline{M}_{\text{bf}}$, luego la fórmula anterior equivale a

$$\begin{aligned} \bigwedge x_1 \cdots x_n \in \overline{M}_{\text{bf}} (\bigwedge x \in \overline{M}_{\text{bf}} (x R x_i \rightarrow \psi^{\overline{M}_{\text{bf}} R}(x, x_1, \dots, x_n))) \\ \leftrightarrow \bigwedge x \in M (x R x_i \rightarrow \psi^{MR}(x, x_1, \dots, x_n))), \end{aligned}$$

que es lo mismo que

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in \overline{M}_{\text{bf}} (\phi^{\overline{M}_{\text{bf}} R}(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \phi^{MR}(x_1, \dots, x_n)). \blacksquare$$

En realidad, para considerar a M_{bf} o \overline{M}_{bf} como modelos de \mathcal{L} necesitamos garantizar que no son vacíos, pero esto es inmediato: teniendo en cuenta que $(M, R) \models \forall x \bigwedge u u \notin x$, vemos que existe un $x \in M$ tal que $e_M(x) = \emptyset$, luego $x \in \overline{M}_{\text{bf}}$ y su colapso transitivo es $\emptyset \in M_{\text{bf}}$.

Más aún, tenemos que

$$(M, R) \models \bigwedge x \bigvee y \bigwedge u (u \in y \leftrightarrow u \in x \vee u = x),$$

pues la sentencia es un teorema de KP, luego, para cada $x \in M$ existe un $y \in M$ tal que $e_M(y) = e_M(x) \cup \{x\}$. En particular, si $x \in \overline{M}_{\text{bf}}$ tenemos que $e_M(y) \subset \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $y \in \overline{M}_{\text{bf}}$. Esto prueba que

$$(\overline{M}_{\text{bf}}, R) \models \bigwedge x \bigvee y \bigwedge u (u \in y \leftrightarrow u \in x \vee u = x),$$

luego lo mismo vale para el modelo isomorfo M_{bf} , y esto significa que

$$\bigwedge x \in M_{\text{bf}} x \cup \{x\} \in M_{\text{bf}}.$$

En particular, una simple inducción prueba ahora que $\omega \subset M_{\text{bf}}$. Más en general, consideraremos el conjunto

$$\Omega^M = \{x \in M \mid x \text{ es un ordinal}^{MR}\}.$$

Como la fórmula “ x es un ordinal” es Δ_0 , tenemos que

$$\Omega^M \cap \overline{M}_{\text{bf}} = \{x \in \overline{M}_{\text{bf}} \mid x \text{ es un ordinal}^{\overline{M}_{\text{bf}} R}\}$$

y

$$\Omega_{\text{bf}}^M = i^{-1}[\Omega^M \cap \overline{M}_{\text{bf}}] = \{x \in M_{\text{bf}} \mid x \text{ es un ordinal}^{M_{\text{bf}}} \} = M_{\text{bf}} \cap \Omega = \Omega^{M_{\text{bf}}}.$$

Claramente entonces, $\Omega_{\text{bf}}^M = \Omega$ o bien Ω_{bf}^M es un ordinal límite (pues hemos probado que si $\alpha \in \Omega_{\text{bf}}^M$ entonces $\alpha \cup \{\alpha\} \in \Omega_{\text{bf}}^M$).

El hecho de que en KP pueda probarse que la clase Ω está bien ordenada por la relación $\alpha \leq \beta \leftrightarrow \alpha \in \beta \vee \alpha = \beta$ se traduce en que el conjunto Ω^M está totalmente ordenado por la relación $\alpha \leq_R \beta \leftrightarrow \alpha R \beta \vee \alpha = \beta$, si bien no podemos garantizar que \leq_R sea un buen orden, pues un subconjunto no vacío de Ω^M no tiene por qué ser la extensión de un elemento de M , luego no tiene por qué tener mínimo elemento.

Ahora usamos que

$$(M, R) \models \bigwedge x \bigvee^1 \alpha \in \Omega \ \alpha = \text{rang}(x),$$

lo que nos permite definir la función $\text{rang}_M^R : M \longrightarrow \Omega^M$ dada por

$$\text{rang}_M^R(x) = \text{rang}^{MR}(x).$$

Más precisamente, tenemos que

$$(M, R) \models \bigwedge x \alpha (\alpha \in \text{rang}(x) \leftrightarrow \bigvee u \in x \ \alpha \in \text{rang}(u) + 1),$$

lo cual se traduce en que

$$e_M(\text{rang}_M^R(x)) = \bigcup_{u \in e_M(x)} (e_M(\text{rang}_M^R(u)) \cup \{\text{rang}_M^R(u)\}).$$

De aquí deducimos primero que si $x \in \overline{M}_{\text{bf}}$, entonces $\text{rang}_M^R(x) \in \overline{M}_{\text{bf}}$. Lo probamos por inducción sobre R , es decir, lo suponemos cierto para los elementos de $e_M(x)$ y hemos de probarlo para x . Así, en la fórmula anterior, por hipótesis de inducción tenemos que $\text{rang}_M^R(u) \in \overline{M}_{\text{bf}}$, de donde resulta que $e_M(\text{rang}_M^R(x)) \subset \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $\text{rang}_M^R(x) \in \overline{M}_{\text{bf}}$.

Por lo tanto, si $x \in M_{\text{bf}}$ tenemos que $\text{rang}_M^R(i(x)) \in \overline{M}_{\text{bf}} \cap \Omega^M$, luego existe un único $r(x) \in \Omega_{\text{bf}}^M$ tal que $\text{rang}_M^R(i(x)) = i(r(x))$. En otras palabras, tenemos una aplicación r que hace commutativo el diagrama

$$\begin{array}{ccc} M_{\text{bf}} & \xrightarrow{i} & M \\ r \downarrow & & \downarrow \text{rang}_M^R \\ \Omega_{\text{bf}}^M & \xrightarrow{i} & \Omega^M \end{array}$$

En términos de r tenemos que, para todo $x \in M_{\text{bf}}$,

$$e_M(\text{rang}_M^R(i(x))) = \bigcup_{u \in e_M(i(x))} e_M(\text{rang}_M^R(u)) \cup \{\text{rang}_M^R(u)\},$$

es decir,

$$\begin{aligned} i[r(x)] &= e_M(i(r(x))) = \bigcup_{u \in x} e_M(\text{rang}_M^R(i(u))) \cup \{\text{rang}_M^R(i(u))\} \\ &= \bigcup_{u \in x} e_M(i(r(u))) \cup \{i(r(u))\} = \bigcup_{u \in x} i[r(u)] \cup \{i(r(u))\} \end{aligned}$$

$$= \bigcup_{u \in x} i[r(u) \cup \{r(u)\}] = i \left[\bigcup_{u \in x} r(u) + 1 \right],$$

luego

$$r(x) = \bigcup_{u \in x} r(u) + 1,$$

y esto implica que $\bigwedge x \in M_{\text{bf}} r(x) = \text{rang}(x)$, luego el diagrama comutativo anterior se reduce a

$$\begin{array}{ccc} M_{\text{bf}} & \xrightarrow{i} & M \\ \text{rang} \downarrow & & \downarrow \text{rang}_M^R \\ \Omega_{\text{bf}}^M & \xrightarrow{i} & \Omega^M \end{array}$$

Ahora podemos probar que un elemento de M está bien fundado si y sólo si lo está su rango:

$$\overline{M}_{\text{bf}} = \{x \in M \mid \text{rang}_M^R(x) \in \overline{M}_{\text{bf}}\}.$$

En efecto, una inclusión ya la tenemos probada y, si $\text{rang}_M^R(x) \in \overline{M}_{\text{bf}}$, observamos que¹⁰

$$(M, R) \models \bigwedge u x (u \in \text{ct } x \rightarrow \text{rang } u < \text{rang } x),$$

luego $\bigwedge u \in \text{ct}_M(x) \text{ rang}_M^R(u) \in e_M(\text{rang}_M^R(x))$, luego

$$\bigwedge u \in \text{ct}_M(x) \text{ rang}_M^R(u) \in \overline{M}_{\text{bf}}.$$

Si $X \subset \text{ct}_M(x)$ es un conjunto no vacío, entonces $Y = \text{rang}_M^R[X] \subset \overline{M}_{\text{bf}}$ es un conjunto no vacío, luego tiene un elemento R -minimal, que será de la forma $a = \text{rang}_M^R(u)$ para un cierto $u \in X$. Este u es un R -minimal de X , pues si existe $v \in X$ tal que $v R u$, entonces $r = \text{rang}_M^R(v)$ cumple $r \in Y$ y $r R a$, contradicción. Esto prueba que R está bien fundada en $\text{ct}_M(x)$, luego $x \in \overline{M}_{\text{bf}}$.

En particular, el modelo M está bien fundado, es decir, $M = \overline{M}_{\text{bf}}$, si y sólo si $i[\Omega_{\text{bf}}^M] = \Omega^M \cap \overline{M}_{\text{bf}} = \Omega^M$, es decir, si y sólo si todos los ordinales de M están bien fundados.

El teorema siguiente es una de las razones por las que tiene interés la teoría KP al estudiar modelos de teorías de conjuntos:

Teorema 2.36 *Si (M, R) es un modelo de KP en el que la relación R es conjuntista, entonces su parte bien fundada M_{bf} es un modelo transitivo de KP.*

DEMOSTRACIÓN: En primer lugar, M_{bf} cumple el axioma de extensionalidad simplemente por ser transitivo, y por el mismo motivo cumple el axioma de regularidad de KP. En efecto, dada cualquier fórmula $\phi(u, x_1, \dots, x_n)$, se trata de probar que

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in M_{\text{bf}} (\bigvee u \in M_{\text{bf}} \phi^{M_{\text{bf}}}(u) \rightarrow \bigvee u \in M_{\text{bf}} (\phi(u) \wedge \bigwedge v \in u \neg \phi^{M_{\text{bf}}}(v))).$$

¹⁰En efecto, basta observar que el conjunto $\{u \in \text{ct } x \mid \text{rang } u < \text{rang } x\}$ es transitivo y contiene a x , luego es $\text{ct } x$.

Para probarlo basta considerar el conjunto $A = \{x \in M_{\text{bf}} \mid \phi^{M_{\text{bf}}}(x)\} \neq \emptyset$ y tomar un $u \in A$ de rango mínimo.

El axioma del par y el de la unión se traspasan fácilmente de M a M_{bf} . Comprobamos el caso de la unión y dejamos al lector el del par, que es más fácil. Dado $x \in M_{\text{bf}}$, tenemos que

$$\forall y \in M \wedge u \in M (u R y \leftrightarrow \forall v (v R i(x) \wedge u R v)).$$

Teniendo en cuenta que $e(i(x)) = i[x]$, esto equivale a que existe $y \in M$ tal que

$$e_M(y) = \bigcup_{v \in x} e_M(i(v)) = \bigcup_{v \in x} i[v] = i \left[\bigcup_{v \in x} v \right].$$

Esto implica que $y \in \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $y = i(y')$, para un $y' \in M_{\text{bf}}$ tal que

$$i[y'] = i \left[\bigcup_{v \in x} v \right],$$

luego $y' = \bigcup_{v \in x} v \in M_{\text{bf}}$.

También es fácil demostrar el axioma de Δ_0 -especificación: dados conjuntos $x_1, \dots, x_n, x \in M_{\text{bf}}$ y una fórmula $\phi(u, x_0, \dots, x_n)$ de clase Δ_0 , tenemos que existe un $y \in M$ tal que

$$\wedge u \in M (u R y \leftrightarrow u R i(x) \wedge \phi^{MR}(u, i(x_1), \dots, i(x_n)))$$

con lo que $e_M(y) \subset e_M(i(x)) \subset \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $y \in \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $y = i(y')$ para un cierto $y' \in M_{\text{bf}}$ tal que

$$\wedge u \in M (u \in i(y') \leftrightarrow u \in i(x) \wedge \phi(u, i(x_1), \dots, i(x_n)))^{MR}.$$

En particular, para todo $u \in M_{\text{bf}}$ tenemos que

$$(i(u) \in i(y') \leftrightarrow u \in i(x) \wedge \phi(u, i(x_1), \dots, i(x_n)))^{MR}.$$

Y, como hemos visto que i es Δ_0 -elemental, esto implica que

$$(u \in y' \leftrightarrow u \in x \wedge \phi(u, x_1, \dots, x_n))^{M_{\text{bf}}}.$$

Así pues,

$$M_{\text{bf}} \models \wedge x \vee y \wedge u (u \in y \leftrightarrow (u \in x \wedge \phi(u, x_1, \dots, x_n))),$$

que es el axioma de Δ_0 -especificación.

El único axioma de KP para el que la transferencia no es trivial es el de Δ_0 -recolección. Para probarlo fijamos una fórmula $\phi(u, v, x_1, \dots, x_n)$ de clase Δ_0 y conjuntos $x, x_1, \dots, x_n \in M_{\text{bf}}$ y suponemos que

$$\wedge u \in x \vee v \in M_{\text{bf}} \phi(u, v, x_1, \dots, x_n).$$

Podemos suponer que $M \neq \overline{M}_{\text{bf}}$ o de lo contrario el resultado es trivial. Según hemos visto, esto implica que $\Omega^M \neq i[\Omega_{\text{bf}}^M]$, luego existe $\alpha \in \Omega^M \setminus i[\Omega_{\text{bf}}^M]$.

Para cada $u \in x$ existe un $v \in M_{\text{bf}}$ tal que $\phi^{M_{\text{bf}}}(u, v, x_1, \dots, x_n)$. Como i es Δ_0 -elemental, $\phi^{MR}(i(u), i(v), i(x_1), \dots, i(x_n))$.

Por otra parte, $\text{rang}_M^R(i(v)) R \alpha$, porque en caso contrario tendría que ser $\text{rang}_M^R(i(v)) = \alpha$ o bien $\alpha R \text{rang}_M^R(i(v))$, y en ambos casos concluiríamos que $\alpha \in i[\Omega_{\text{bf}}^M]$. Por consiguiente tenemos

$$(\bigwedge u \in i(x) \bigvee v (\phi(u, v, i(x_1), \dots, i(x_n)) \wedge \text{rang}(v) < \alpha))^{MR}.$$

Pero la fórmula $\text{rang}(v) < \alpha$ es Δ_1^{KP} , ya que

$$\text{rang}(v) < \alpha \leftrightarrow \bigvee y (y = \text{rang}(v) \wedge y \in \alpha) \leftrightarrow \bigwedge y (y = \text{rang}(v) \rightarrow y \in \alpha).$$

Como (M, R) verifica el teorema de Δ_1 -recolección, existe un $y \in M$ tal que

$$(\bigwedge u \in i(x) \bigvee v \in y (\phi(u, v, i(x_1), \dots, i(x_n)) \wedge \text{rang}(v) < \alpha))^{MR}.$$

Ahora usamos que M satisface el teorema de Δ_1 -especificación, por lo que existe un $a \in M$ tal que

$$(\bigwedge \beta (\beta \in a \leftrightarrow \beta \in \alpha + 1 \wedge \\ (\bigwedge u \in i(x) \bigvee v \in y (\phi(u, v, i(x_1), \dots, i(x_n)) \wedge \text{rang}(v) < \beta)))^{MR}.$$

Como M satisface el axioma de regularidad, el conjunto a tiene un mínimo elemento, es decir, existe un $\alpha_0 \in M$ (más concretamente, $\alpha_0 \in \Omega^M$) tal que

$$(\alpha_0 \in a \wedge \bigwedge \beta \in \alpha_0 \beta \notin a)^{MR}.$$

Veamos que $e_M(\alpha_0) \subset \overline{M}_{\text{bf}}$. En efecto, si $\beta R \alpha_0$ no fuera estándar (no estuviera bien fundado), entonces

$$(\bigwedge u \in i(x) \bigvee v \in y (\phi(u, v, i(x_1), \dots, i(x_n)) \wedge \text{rang}(v) < \beta))^{MR},$$

pues antes hemos probado esto mismo para α usando tan sólo que α es un ordinal no estándar, luego lo mismo vale para β . Además $\beta R \alpha_0 \wedge \alpha_0 R \alpha$ implica que $\beta R \alpha$, pues R es transitiva sobre los elementos de Ω^M . Esto implica que $\beta R a$, en contradicción con la minimalidad de α_0 .

Por consiguiente $\alpha_0 \in \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $\alpha_0 = i(\alpha_1)$, para un cierto $\alpha_1 \in \Omega_{\text{bf}}^M$. Así

$$(\bigwedge u \in i(x) \bigvee v \in y (\phi(u, v, i(x_1), \dots, i(x_n)) \wedge \text{rang}(v) < i(\alpha_1)))^{MR}.$$

De nuevo por Δ_1 -especificación existe un $z \in M$ tal que

$$(\bigwedge v (v \in z \leftrightarrow v \in y \wedge \text{rang}(v) < i(\alpha_1)))^{MR}.$$

Esto implica que $(\text{rang}(z) \leq i(\alpha_1))^{MR}$, luego $\text{rang}_M^R(z) \in \overline{M}_{\text{bf}}$, con lo que $z \in \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $z = i(z')$, para cierto $z' \in M_{\text{bf}}$. En total

$$(\bigwedge u \in i(x) \bigvee v \in i(z') \phi(u, v, i(x_1), \dots, i(x_n)))^{MR},$$

pero esta fórmula es de clase Δ_0 , luego

$$(\bigwedge u \in x \bigvee v \in z' \phi(u, v, x_1, \dots, x_n))^{M_{\text{bf}}},$$

o también

$$\bigvee y \in M_{\text{bf}} \bigwedge u \in x \bigvee v \in y \phi(u, v, x_1, \dots, x_n),$$

que es lo que había que probar.

Si el modelo de partida M es un conjunto, la demostración puede modificarse trivialmente para probar que $M_{\text{bf}} \models \text{KP}$ en el sentido de la teoría de modelos. ■

Así pues, KP tiene la notable propiedad de que se conserva al restringir un modelo no necesariamente bien fundado a su parte bien fundada, propiedad que no tiene ZFC. Si partimos de un modelo de ZFC podemos obtener un poco más:

Teorema 2.37 *Si (M, R) es un modelo de ZF en el que la relación R es conjuntista, entonces M_{bf} es un modelo transitivo de KP que además cumple el axioma de los rangos:*

$$\bigwedge \alpha \bigvee a \bigwedge x (x \in a \leftrightarrow \text{rang } x < \alpha),$$

y en particular el axioma de partes. Si (M, R) cumple el axioma de elección, lo mismo le sucede a M_{bf} .

DEMOSTRACIÓN: Observemos que el axioma de los rangos afirma simplemente que las clases V_α son conjuntos. Añadido a KP, permite demostrar el axioma de partes AP, pues si x es un conjunto y $\text{rang } x = \alpha$, entonces todo $u \subset x$ cumple $u \subset V_\alpha$, luego

$$\mathcal{P}x = \{u \in V_{\alpha+1} \mid u \subset x\}$$

es un conjunto por Δ_0 -especificación.

En realidad vamos a probar que si (M, R) es un modelo de KP más el axioma de los rangos, lo mismo vale para M_{bf} . En efecto, si $\alpha \in M_{\text{bf}} \cap \Omega$, entonces $i(\alpha) \in \Omega^M$, luego por el axioma de los rangos en (M, R) existe un $\overline{A} \in M$ tal que

$$e_M(\overline{A}) = \{x \in M \mid \text{rang}_M^R(x) < i(\alpha)\}.$$

Ahora bien, $\text{rang}_M^R(x) < i(\alpha)$ implica que $\text{rang}_M^R(x) \in \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $x \in \overline{M}_{\text{bf}}$. Por lo tanto, $e_M(\overline{A}) \subset \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $\overline{A} \in \overline{M}_{\text{bf}}$, luego $\overline{A} = i(A)$, para cierto $A \in M_{\text{bf}}$. Así, para todo $x \in M_{\text{bf}}$,

$$x \in A \leftrightarrow i(x) \in \overline{A} \leftrightarrow \text{rang}_M^R(i(x)) < i(\alpha) \leftrightarrow \text{rang } x < \alpha,$$

lo que prueba que M_{bf} cumple el axioma de los rangos, y en particular el axioma de partes.

Si M cumple AE, dado $X \in M_{\text{bf}}$, sea $\overline{S} \in M$ tal que

$$(\overline{S} \text{ es un buen orden en } i(X))^{MR}.$$

Entonces $e_M(\bar{S}) \subset i(X \times X)$, luego $\bar{S} \in \bar{M}_{\text{bf}}$, luego existe un $S \in M_{\text{bf}}$ tal que $\bar{S} = i(S)$. Observemos ahora que “ S es un buen orden en X ” es una propiedad Π_1 , es decir, de la forma $\bigwedge u \phi(u, S, X)$, donde ϕ es Δ_0 .

Tenemos $\bigwedge u \in M \phi^{MR}(u, i(S), i(X))$, luego en particular

$$\bigwedge u \in M_{\text{bf}} \phi^{MR}(i(u), i(S), i(X))$$

y, como i es Δ_0 elemental, $\bigwedge u \in M_{\text{bf}} \phi(u, S, X)$, lo que significa que (S es un buen orden en X) $^{M_{\text{bf}}}$, y esto implica claramente $\text{AE}^{M_{\text{bf}}}$. ■

Más delicado es el caso del axioma de infinitud. En general, la parte bien fundada de un modelo de ZFC no tiene por qué cumplirlo. El axioma de infinitud en M_{bf} equivale a que $\omega \in \Omega_{\text{bf}}^M$ y lo más que podemos hacer es reformular esta condición, para lo cual definimos

$$\omega^M = \{x \in M \mid x \text{ es un número natural}^{MR}\}.$$

Como la fórmula “ x es un número natural” es Δ_0 e i es Δ_0 -elemental, tenemos que $i[\omega] \subset \omega^M \subset \Omega^M$.

Definición 2.38 Un modelo (M, R) de KP es un *modelo* ω si $i[\omega] = \omega^M$, es decir, si todos sus números naturales son estándar.

Obviamente, todo modelo bien fundado (en particular, todo modelo transitivo) es un modelo ω . Observemos que si M no es un modelo ω , entonces $\Omega_{\text{bf}}^M = \omega$, pues si $\omega \in \Omega_{\text{bf}}^M$, entonces, como la fórmula

$$\phi(x) \equiv x \in \Omega \wedge 0 \in x \wedge \bigwedge n \in x \ n + 1 \in x$$

es Δ_0 y $\phi^{M_{\text{bf}}}(\omega)$, concluimos que $\phi^{MR}(i(\omega))$. Pero

$$(M, R) \models \bigwedge x (\phi(x) \rightarrow \bigwedge n (n \text{ es un número natural} \rightarrow n \in x)),$$

pues la sentencia es un teorema de KP, luego $\omega^M \subset e_M(i(\omega)) = i[\omega]$, contradicción.

Así pues, para que M_{bf} pueda cumplir AI es necesario que M sea un modelo ω . La condición es claramente suficiente (siempre y cuando M satisfaga AI, por supuesto):

Teorema 2.39 Si (M, R) es un modelo ω de KP + AI, entonces M_{bf} es un modelo transitivo de KP + AI.

DEMOSTRACIÓN: Que M satisfaga AI equivale a que existe un $w \in M$ tal que $e_M(w) = \omega^M$. Como $\omega^M = i[\omega]$, resulta que $e_M(w) \subset \bar{M}_{\text{bf}}$, luego $w \in \bar{M}_{\text{bf}}$, luego existe un ordinal $\alpha \in \Omega_{\text{bf}}^M$ tal que $i(\alpha) = w$, luego

$$i[\alpha] = e_M(i(\alpha)) = e_M(w) = i[\omega],$$

luego $\omega = \alpha \in \Omega_{\text{bf}}^M$, luego $M_{\text{bf}} \models \text{AI}$. ■

Así pues, si (M, R) es un modelo ω de ZFC, podemos asegurar que su parte bien fundada M_{bf} satisface KP más los axiomas de infinitud, partes y elección (y, de hecho, satisface también el axioma de los rangos).

Nota Por el segundo teorema de incompletitud de Gödel, de la existencia de un modelo de ZFC no puede deducirse la existencia de un modelo ω de ZFC (salvo que $ZFC + \text{Consis ZFC}$ sea contradictorio). Esbozamos la prueba: si es consistente $ZFC + \text{Consis ZFC}$, también lo es

$$ZFC + \text{Consis ZFC} + \neg \text{Consis}(ZFC + \text{Consis ZFC})$$

y en esta teoría existe un modelo (M, R) de ZFC, pero no existen modelos de $ZFC + \text{Consis ZFC}$, luego en todo modelo de ZFC se cumple $\neg \text{Consis ZFC}$, y eso implica que no es un modelo ω . Por lo tanto, si en esta teoría no puede construirse un modelo ω de ZFC a partir de un modelo de ZFC, en ZFC tampoco.

■

Capítulo III

Constructibilidad

Aquí presentaremos la clase L de los conjuntos constructibles, el modelo interno de ZFC con el que Gödel demostró la consistencia del axioma de elección y de la hipótesis del continuo generalizada, aunque la importancia de este modelo, tanto desde un punto de vista teórico como a la hora de obtener más pruebas de consistencia, va mucho más allá de estos resultados.

El hecho de que, a partir de los axiomas de ZFC, no pueda concretarse el cardinal de $\mathcal{P}\omega$, o que no pueda demostrarse que existe un buen orden en $\mathcal{P}\omega$ sin la ayuda de AE, son dos consecuencias de que, en realidad, el operador $\mathcal{P}x$ carece de un significado específico. Por mucho que podamos decir que “conocemos bien” un conjunto x , como es el caso de ω , no por ello podemos decir que sepamos qué contiene $\mathcal{P}x$. La expresión “todos los subconjuntos de x ” es una expresión hueca y sólo adquiere un significado concreto si postulamos la existencia de una clase universal V y entendemos que $\mathcal{P}x$ está formada por los elementos de V que tienen la propiedad de estar contenidos en x , pero no es x , sino V , quien determina $\mathcal{P}x$.

Esto hace que, aunque a primera vista, la jerarquía regular

$$V_0 = \emptyset, \quad V_{\alpha+1} = \mathcal{P}V_\alpha, \quad V_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} V_\delta, \quad V = \bigcup_{\alpha \in \Omega} V_\alpha$$

“determina” la clase de todos los conjuntos, en el sentido de que “construye” la totalidad de los conjuntos a partir del conjunto vacío, esto es una mera apariencia. En realidad lo es por un doble motivo. En primer lugar, porque presupone ya la clase Ω de todos los ordinales, pero también porque, aunque los primeros niveles de la jerarquía, hasta V_ω inclusive, están completamente determinados, ya no podemos decir lo mismo de $V_{\omega+1} = \mathcal{P}V_\omega$. No podemos considerar como una “auténtica definición” que $V_{\alpha+1}$ contiene todos los conjuntos formados por elementos “ya construidos”, es decir, elementos de V_α , porque lo de “todos los conjuntos” no significa nada si no es en relación a una clase V previamente fijada. Así, no construimos V a partir de los V_α , sino que estamos haciendo referencia a V para construir cada nivel $V_{\alpha+1}$.

Pese a ello, la jerarquía regular impone una cierta estructura a la clase universal, una estructura que no tendría por qué tener en ausencia del axioma de regularidad. La idea de Gödel es imponer una estructura “más fina” mediante una jerarquía alternativa:

$$L_0 = \emptyset, \quad L_{\alpha+1} = \mathcal{P}\mathcal{D}L_\alpha, \quad L_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} L_\delta, \quad L = \bigcup_{\alpha \in \Omega} L_\alpha,$$

en la que la diferencia es la forma en que se pasa de cada L_α a $L_{\alpha+1}$. En lugar de considerar “todos” los subconjuntos de L_α (lo que implícitamente supone conocer ya V para especificar los subconjuntos de L_α) definimos $L_{\alpha+1}$ como el conjunto de “partes definibles” de L_α , que consiste en todos los subconjuntos que pueden especificarse a partir de L_α mediante una fórmula que no haga referencia a nada externo a L_α . En general, el conjunto $\mathcal{P}\mathcal{D}X$ de las partes definibles de un conjunto X está formado por todos los conjuntos de la forma

$$\{u \in X \mid X \models \phi[u, x_1, \dots, x_n]\},$$

donde $n \in \omega$, $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ y $x_1, \dots, x_n \in X$. Notemos que, al usar \models , las variables ligadas de ϕ se interpretan recorriendo únicamente los elementos de X , luego para especificar de este modo un subconjunto de X no es necesario conocer nada externo a X , y los conjuntos así definidos son los que son, uno para cada fórmula ϕ y cada elección de parámetros en X (sin perjuicio de que un mismo conjunto admita definiciones distintas), por lo que sí que podemos decir que, por ejemplo, $\mathcal{P}\mathcal{D}\omega$ o $\mathcal{P}\mathcal{D}L_\omega$ son conjuntos perfectamente determinados.

La clase L construida de este modo es la clase de los conjuntos constructibles, y demostraremos que es un modelo de ZFC más el axioma de constructibilidad $V = L$, de modo que, si ZF es consistente, también lo es añadir como axioma que todo conjunto es constructible, y ello supone precisar un poco más lo que entendemos por conjunto. Seguimos sin poder decir que la jerarquía constructible determina únicamente unos objetos a los que llamar “conjuntos”, pero ahora ello se debe a que haría falta precisar de algún modo (y no es posible hacerlo) qué hay que entender por L_{ω_1} , pero no tenemos ninguna descripción “tangible” de los ordinales que hay que recorrer hasta llegar a ω_1 . Sin embargo, como veremos, la precisión que supone restringir el concepto indeterminado de “conjunto” por el mejor precisado de “conjunto constructible” es suficiente para demostrar el axioma de elección y la hipótesis del continuo generalizada.

3.1 Definibilidad

Dedicamos esta primera sección a introducir y estudiar el concepto de “partes definibles” del que acabamos de hablar. Es importante que cuanto vamos a hacer aquí se puede formalizar en KPI o, alternativamente, en ZF–AP.

Tal y como hemos explicado, queremos que las partes definibles de un conjunto X sean sus subconjuntos definibles mediante una fórmula (con posibles

parámetros) sin hacer referencia a nada externo a X . Sin embargo, conviene trabajar en un contexto ligeramente más general que nos permita, opcionalmente, tener en cuenta alguna información “externa” a X .

Para ello vamos a considerar el lenguaje formal $\mathcal{L}_{\text{tc}}^+$ que resulta de añadirle a \mathcal{L}_{tc} un relator monádico R , de modo que un modelo natural de \mathcal{L}_{tc} vendrá determinado por un par de conjuntos (X, A) , donde X es el universo del modelo y el relator R se interpreta como la pertenencia a A . No exigimos que $A \subset X$, pero lo cierto es que (X, A) y $(X, X \cap A)$ determinan el mismo modelo de $\mathcal{L}_{\text{tc}}^+$.

Es inmediato que la relación $M \models \phi[s]$ que hemos considerado en los capítulos anteriores, donde $\phi \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ y $s \in M^n$, se puede modificar trivialmente para convertirla en $(X, A) \models \phi[s]$, donde ahora la fórmula ϕ puede incorporar el nuevo relator R , y todo lo dicho vale igualmente (como que se trata de una fórmula Δ_1).

Relaciones definibles Definimos las *relaciones definibles* en un conjunto X respecto de un conjunto A como las relaciones de la forma¹

$$S(X, A, n, \phi) = \{s \in X^n \mid (X, A) \models \phi[s]\},$$

donde $n \in \omega$ y $\phi \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$ es una fórmula de $\mathcal{L}_{\text{tc}}^+$ cuyas variables libres están entre x_0, \dots, x_{n-1} . A su vez definimos²

$$\text{Df}_A(X, n) = \{S(X, A, n, \phi) \mid \phi \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)\}.$$

Abreviaremos $\text{Df}(X, n) \equiv \text{Df}_\emptyset(X, n)$.

Si estuviéramos trabajando en ZF, podríamos justificar la existencia de $\text{Df}_A(X, n)$ por especificación a partir de $\mathcal{P}X^n$, pero en ZF–AP podemos usar el axioma de reemplazo, que nos da, de hecho, una aplicación suprayectiva $\text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+) \rightarrow \text{Df}_A(X, n)$.

Esto vale también en KPI por Σ_1 -reemplazo, ya que

$$S = S(X, A, n, \phi) \leftrightarrow (n \in \omega \wedge \phi \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+) \wedge \bigvee Z(Z = X^n \wedge S \subset Z \wedge \bigwedge s \in Z(s \in S \leftrightarrow (X, A) \models \phi[s]))) \vee ((n \notin \omega \vee \phi \notin \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)) \wedge S = \emptyset)$$

es una fórmula Σ_1 .

Más aún, el término $\text{Df}_A(X, n)$ es Δ_1 , tanto en KPI como en ZF–AP, pues

$$\begin{aligned} Y = \text{Df}_A(X, n) &\leftrightarrow n \in \omega \wedge \bigvee H(H = H_{X, A} \wedge \bigwedge S \in Y \bigvee \alpha \in \omega^{<\omega} (\\ S &\subset X^{<\omega} \wedge \alpha \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+) \wedge \bigwedge s \in X^{<\omega} (s \in S \leftrightarrow \ell(s) = n \wedge H(\alpha, s) = 1) \\ &\wedge \bigwedge \alpha \in \omega^{<\omega} (\alpha \in \text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+) \rightarrow \bigvee S \in Y \bigwedge s \in X^{<\omega} \\ &(s \in S \leftrightarrow \ell(s) = n \wedge H(\alpha, s) = 1))). \end{aligned}$$

¹En KPI la existencia de $S(X, A, n, \phi)$ se justifica por Δ_1 -especificación a partir de X^n .

²Con el convenio de que $(\emptyset, A) \models [s]$ es trivialmente verdadera, tenemos que

$$S(\emptyset, A, n, \phi) = \emptyset \text{ si } n > 0, \quad S(\emptyset, A, 0, \phi) = \{\emptyset\},$$

luego $\text{Def}_A(\emptyset, n) = \{\emptyset\}$ para $n > 0$ y $\text{Def}_A(\emptyset, 0) = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$.

Aquí hemos usado la fórmula $H = H_{X,A}$, que es la análoga a la fórmula $H = H_{M,R}$ considerada en el teorema 1.3, salvo que eliminamos la relación R que interpreta al relator de pertenencia y añadimos el conjunto A que interpreta al relator adicional de $\mathcal{L}_{\text{tc}}^+$. Tenemos entonces que la fórmula tras $\bigvee H$ es Δ_0 en los parámetros $\omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}, X^{<\omega}$, luego el término $\text{Df}_A(X, n)$ es Σ_1 y, por consiguiente, Δ_1 .

El teorema siguiente es ahora inmediato:

Teorema 3.1 *Si n es un número natural y $\phi(x_0, \dots, x_{n-1})$ es una fórmula metamatemática, y X y A son conjuntos cualesquiera,*

$$\{s \in X^n \mid \phi^X(s_0, \dots, s_{n-1})\} \in \text{Df}_A(X, n).$$

También es claro que $\text{Df}_A(X, n) = \text{Df}_{A \cap X}(X, n)$, pues A sólo interviene en la definición a través del modelo determinado por (X, A) , que es el mismo que el modelo determinado por $(X, A \cap X)$.

Notemos también que la aplicación $\text{Form}^n(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+) \rightarrow \text{Df}_A(X, n)$ determinada por $\phi \mapsto S(X, A, n, \phi)$ es suprayectiva y prueba que $\text{Df}_A(X, n)$ es siempre un subconjunto numerable de X^n .

Partes definibles Ya estamos en condiciones de definir el conjunto de las partes definibles de un conjunto dado. En primer lugar, dados conjuntos X y A , un $n \in \omega$, un $s \in X^n$ y una relación $S \in \text{Def}_A(X, n+1)$, definimos

$$x(X, n, s, S) = \{u \in X \mid s \cup \{(n, u)\} \in S\}.$$

Notemos que la definición es válida en KPI por Δ_0 -especificación. Por definición de $\text{Def}_A(X, n)$, existe una fórmula $\phi \in \text{Form}^{n+1}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$ tal que

$$t \in S \leftrightarrow (X, A) \models \phi[t],$$

luego

$$x(X, n, s, S) = \{u \in X \mid (X, A) \models \phi[s_1, \dots, s_n, u]\}.$$

Vemos, pues, que $x(X, n, s, S)$ es el subconjunto de X definido por la fórmula ϕ que determina la relación S con parámetros $s \in X^n$.

Esto nos lleva a definir el conjunto de las *partes definibles* de un conjunto X respecto de un conjunto A como³

$$\mathcal{P}\mathcal{D}_A X = \{x(X, n, s, S) \mid n \in \omega \wedge s \in X^n \wedge S \in \text{Df}_A(X, n+1)\}.$$

Abreviaremos $\mathcal{P}\mathcal{D}X \equiv \mathcal{P}\mathcal{D}_\emptyset X$.

Notemos que $\text{Df}(X, n)$ y $\mathcal{P}\mathcal{D}X$ pueden definirse directamente trabajando con \mathcal{L}_{tc} en lugar de $\mathcal{L}_{\text{tc}}^+$ y omitiendo toda referencia al conjunto A .

³Con los convenios que hemos adoptado resulta que $\mathcal{P}\mathcal{D}\emptyset = \{\emptyset\} = \mathcal{P}\emptyset$.

Observemos que en ZF–AP la existencia de $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ está justificada por el axioma de reemplazo, que nos da una aplicación suprayectiva

$$\bigcup_{n \in \omega} (X^n \times \text{Df}_A(X, n+1)) \longrightarrow \mathcal{P}\mathcal{D}_A X.$$

Lo mismo vale en KPI previa comprobación de que podemos aplicar Σ_1 -reemplazo. En efecto, se comprueba sin dificultad que el término

$$\{n\} \times X^n \times \text{Df}_A(X, n+1)$$

es Δ_1 , lo que permite definir por Σ_1 -reemplazo el conjunto

$$\{\{n\} \times X^n \times \text{Df}_A(X, n+1) \mid n \in \omega\},$$

cuya unión es el conjunto

$$D = \{(n, s, S) \mid n \in \omega \wedge s \in X^n \wedge S \in \text{Df}_A(X, n+1)\}.$$

Observamos que

$$y = x(X, n, s, S) \leftrightarrow \bigwedge u \in y (u \in X \wedge s \cup \{(n, u)\} \in S) \wedge$$

$$\bigwedge u \in X (s \cup \{(n, u)\} \in S \rightarrow u \in y),$$

de donde se sigue que el término $x(X, n, s, S)$ es Δ_1 (aunque no es difícil ver que en realidad es Δ_0). Por consiguiente, podemos aplicar Σ_1 -reemplazo para definir

$$\mathcal{P}\mathcal{D}_A X \equiv \{x(X, n, s, A) \mid (n, s, S) \in D\}.$$

Veamos ahora que el término $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ es Δ_1 tanto en KPI como en ZF–AP. En efecto,

$$\begin{aligned} Y = \mathcal{P}\mathcal{D}_A X &\leftrightarrow \bigvee H (H = H_{X,A} \wedge \bigwedge y \in Y \bigvee n \in \omega \bigvee \alpha \in \omega^{<\omega} \bigvee s \in X^{<\omega} \\ &\quad (\alpha \in \text{Form}^{n+1}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \wedge \ell(s) = n \wedge y \subset X \wedge \\ &\quad \bigwedge u \in X (u \in y \leftrightarrow H(\alpha, s \cup \{(n, u)\}) = 1) \wedge \bigwedge n \in \omega \bigwedge \alpha \in \omega^{<\omega} \bigwedge s \in X^{<\omega} \\ &\quad (\alpha \in \text{Form}^{n+1}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+) \wedge \ell(s) = n \rightarrow \\ &\quad \bigvee y \in Y \bigwedge u \in X (u \in y \leftrightarrow H(\alpha, s \cup \{(n, u)\}) = 1))). \end{aligned}$$

La fórmula tras $\bigvee H$ es Δ_0 en los parámetros ω , $\omega^{<\omega}$, $(\omega^{<\omega})^{<\omega}$, $X^{<\omega}$, luego el término $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ es Σ_1 y, por consiguiente, Δ_1 .

Es inmediato que los subconjuntos de un conjunto X definibles metamatemáticamente mediante una fórmula (relativizada a X) están en el conjunto de partes definibles:

Teorema 3.2 Si $\phi(x_0, \dots, x_n)$ es una fórmula metamatemática, X , A son conjuntos arbitrarios y $a_1, \dots, a_n \in X$, entonces

$$\{u \in X \mid \phi^X(u, a_1, \dots, a_n)\} \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A(X).$$

También es claro que $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X = \mathcal{P}\mathcal{D}_{A \cap M} X$.

Veamos algunas propiedades adicionales del conjunto de partes definibles:

Teorema 3.3 *Sean X y A dos conjuntos cualesquiera. Entonces*

- a) $\mathcal{P}^f X \subset \mathcal{P}\mathcal{D}_A X \subset \mathcal{P}X$.
- b) $X \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$.
- c) $X \cap A \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$.
- d) Si X es transitivo, entonces $X \subset \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$, luego $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ es transitivo.
- e) Si X es finito entonces $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X = \mathcal{P}X$.
- f) [ZFC] Si X es infinito, entonces $|\mathcal{P}\mathcal{D}_A X| = |X|$.

DEMOSTRACIÓN: a) La inclusión $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X \subset \mathcal{P}X$ es inmediata, aunque cabe observar que sin suponer AP la clase $\mathcal{P}X$ no es necesariamente un conjunto, mientras que $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ sí que lo es. Por otra parte, si $x \subset X$ es finito, sea $s \in X^n$ una enumeración de x . Entonces

$$x = \{u \in X \mid (X, A) \models [u] = [s(0)] \vee \dots \vee [u] = [s(n-1)]\} \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X.$$

- b) Por 3.2 tenemos que $X = \{u \in X \mid u = u\} \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$.
- c) $X \cap A = \{u \in X \mid (X, A) \models R[u]\} \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$.
- d) Por 3.2, si $x \in X$ entonces $x = \{u \in X \mid u \in x\} \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$.
- e) es consecuencia inmediata de a).
- f) Por construcción tenemos una aplicación suprayectiva

$$f : \bigcup_{n \in \omega} (X^n \times \text{Df}_A(X, n)) \longrightarrow \mathcal{P}\mathcal{D}_A X,$$

la que a cada $(s, S) \in X^n \times \text{Df}_A(X, n)$ le asigna $s(X, n, s, S)$, con lo que

$$|\mathcal{P}\mathcal{D}_A X| \leq \sum_{n \in \omega} |X^n| |\text{Df}_A(X, n)| = |X|.$$

La desigualdad opuesta se sigue de que $\mathcal{P}^f X \subset \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$. ■

Ejercicio: Probar que $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ es un álgebra de subconjuntos de X .

Ordenación de $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ Sin el axioma de elección, que un conjunto X admita un buen orden no implica que lo mismo valga para $\mathcal{P}X$. Sin embargo, vamos a probar a continuación que un buen orden en un conjunto X induce explícitamente un buen orden en $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$. Este hecho será la clave para demostrar la consistencia del axioma de elección.

Consideramos en $\omega^{<\omega}$ el buen orden en el que dos sucesiones se comparan comparando el primer término en el que difieren, es decir:

$$s \leq_0 t \leftrightarrow s = t \vee \bigvee i (i \in \ell(s) \wedge i \in \ell(t) \wedge \bigwedge j < i s(j) = t(j) \wedge s(i) < t(i)).$$

Ciertamente es un buen orden, y la fórmula $s \leq_0 t$ es Δ_1 . De hecho, es Δ_0 con parámetros $\omega, \omega^{<\omega}$.

Del mismo modo, si \leq es un buen orden en X , la relación en $X^{<\omega}$ dada por

$$s \leq_X^* t \leftrightarrow s = t \vee \bigvee i (i \in \ell(s) \wedge i \in \ell(t) \wedge \bigwedge j < i s(j) = t(j) \wedge s(i) < t(i))$$

es un buen orden, y la fórmula $s \leq_X^* t$ (con cuatro variables libres, s, t, X y \leq) es Δ_0 con parámetros ω y $X^{<\omega}$.

Si \leq es un buen orden en X , podemos definir un buen orden en $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ como sigue:

Para cada $y \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$, podemos considerar el mínimo $\alpha \in \omega^{<\omega}$ (respecto del buen orden \leq_0) tal que α es una fórmula de \mathcal{L}_{tc}^+ que define a y con una cierta sucesión de parámetros $s \in X^{<\omega}$. A su vez, podemos considerar el mínimo s (respecto de \leq_X^*) que define a y mediante la fórmula α . Dados dos elementos $y, z \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$, establecemos que $y \leq_{X,A}^{**} z$ si la mínima fórmula α que define a y es estrictamente menor que la mínima fórmula que define a z o, en caso de que sean iguales, si la mínima sucesión de parámetros que define a y es menor o igual que la mínima sucesión de parámetros que define a z . Es claro que de este modo obtenemos un buen orden, y sigue siéndolo si hacemos un pequeño retoque:

Definimos $y \leq_{X,A} z$ como la relación sobre $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ que sobre los elementos de $X \cap \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ coincide con la relación dada \leq , sobre los elementos de $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X \setminus X$ coincide con la relación $y \leq_{X,A}^{**} z$ que acabamos de definir y que establece que cualquier elemento de $X \cap \mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ es anterior a cualquier elemento de $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X \setminus X$.

El lector no debería necesitar el desarrollo explícito de esta definición (que sería bastante farragoso) para convencerse de que la fórmula $y \leq_{X,A} z$ (con cinco variables libres, incluida \leq) es Δ_0 en los parámetros

$$\omega, \quad \omega^{<\omega}, \quad (\omega^{<\omega})^{<\omega}, \quad X^{<\omega}, \quad H_{X,A}, \quad \mathcal{P}\mathcal{D}_A X,$$

es decir, que cualquiera de las variables necesarias para definirla y que no pueda acotarse por ninguna otra variable, puede acotarse con uno de estos parámetros. Por lo tanto, se trata de una fórmula Δ_1 (tanto en KPI como en ZF–AP).

Más aún, podemos definir (por Δ_1 -especificación en el caso de KPI) el conjunto

$$\leq_{X,A} = \{(y, z) \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X \times \mathcal{P}\mathcal{D}_A X \mid y \leq_{X,A} z\},$$

de modo que

$$R = \leq_{X,A} \leftrightarrow R \subset \mathcal{P}\mathcal{D}_A X \times \mathcal{P}\mathcal{D}_A X \wedge \bigwedge yz \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A X ((y, z) \in R \leftrightarrow y \leq_{X,A} z),$$

con lo que el término $\leq_{X,A}$ es Δ_0 en los mismos parámetros indicados antes y, por consiguiente, es Δ_1 . En resumen, tenemos lo siguiente:

Teorema 3.4 *Existe un término $\leq_{X,A}$ con tres variables libres, de tipo Δ_1 , tal que si (X, \leq) es un conjunto transitivo bien ordenado, entonces $\leq_{X,A}$ es un buen orden en $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ respecto al cual X es una sección inicial de $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$.*

3.2 La jerarquía constructible

Finalmente podemos definir la clase de los conjuntos constructibles. Es importante que la construcción es válida en KPI o, al menos, en ZF–AP:

Definición 3.5 Para cada conjunto A definimos la jerarquía de los *conjuntos constructibles* respecto de A como la sucesión transfinita dada por

$$L_0[A] = \emptyset \wedge \bigwedge \alpha L_{\alpha+1}[A] = \mathcal{P}\mathcal{D}_A L_\alpha[A] \wedge \bigwedge \lambda L_\lambda[A] = \bigcup_{\delta < \lambda} L_\delta[A].$$

La clase de los *conjuntos constructibles* respecto de A es

$$L[A] = \bigcup_{\alpha} L_\alpha[A].$$

En el caso $A = \emptyset$ escribiremos simplemente⁴ $L_\alpha = L_\alpha[\emptyset]$ y $L = L[\emptyset]$.

Notemos que la definición recurrente de $L[A]$ es obviamente correcta en ZF–AP, pero también en KPI, pues en este caso podemos aplicar el teorema de Σ_1 -recursión [LM 12.7] a la función Σ_1 dada por

$$\begin{aligned} Y = G(\alpha, f) \leftrightarrow (\alpha = 0 \wedge Y = \emptyset) \vee \bigvee \beta \in \alpha (\alpha = \beta \cup \{\beta\} \wedge Y = \mathcal{P}\mathcal{D}_A f(\beta)) \\ \vee (\alpha \text{ es un límite} \wedge Y = \bigcup_{\delta < \alpha} f(\delta)). \end{aligned}$$

Dicho teorema nos garantiza además que la fórmula $Y = L_\alpha[A]$ es Σ_1 , luego Δ_1 . La clase $L[A]$ es Σ_1 , en el sentido de que lo es la fórmula $x \in L[A]$, pues equivale a $\bigvee \alpha (\alpha \in \Omega \wedge x \in L_\alpha[A])$.

Luego demostraremos que todo esto es válido también en ZF–AP, pero antes conviene conocer las propiedades básicas de la jerarquía constructible:

Teorema 3.6 *Si A es un conjunto arbitrario, se cumple:*

- a) $L_\alpha[A]$ es un conjunto transitivo.
- b) $L[A]$ es una clase transitiva.

⁴Alternativamente, para definir la clase L podríamos haber definido los conjuntos $\text{Df}(X, n)$ y $\mathcal{P}\mathcal{D}X$ usando el lenguaje \mathcal{L}_{tc} sin añadirle el relator R y sin mencionar ningún conjunto A .

- c) Si $\alpha \leq \beta$, entonces $L_\alpha[A] \subset L_\beta[A]$.
- d) $\mathcal{P}^f L_\alpha[A] \subset L_{\alpha+1}[A] \subset \mathcal{P}L_\alpha[A]$.
- e) $L_\alpha[A] \in L_{\alpha+1}[A]$.
- f) $L_\alpha[A] \subset V_\alpha$.
- g) $\bigwedge n \in \omega L_n[A] = V_n$.
- h) $L_\omega[A] = V_\omega$.
- i) $L_\alpha[A] \cap \Omega = \alpha$.
- j) $\Omega \subset L[A]$.
- k) Si $\bar{A} = A \cap L[A]$, entonces⁵ $L_\alpha[A] = L_\alpha[\bar{A}]$, $L[\bar{A}] = L[A]$ y $\bar{A} \in L[A]$.

DEMOSTRACIÓN: a) Se prueba trivialmente por inducción sobre α teniendo en cuenta 3.3 d). b) es consecuencia inmediata de a).

- c) se prueba por inducción, usando que, como el conjunto $L_\alpha[A]$ es transitivo, $L_\alpha[A] \subset \mathcal{P}D_A L_\alpha[A] = L_{\alpha+1}[A]$, también por 3.3 d).
- d) Por 3.3 a).
- e) Por 3.3 b).
- f) se prueba trivialmente por inducción.
- g) Por inducción sobre n . Si es cierto para n , entonces en particular $L_n[A]$ es finito, luego, por 3.3 e), $L_{n+1}[A] = \mathcal{P}D_A L_n[A] = \mathcal{P}V_n = V_{n+1}$.
- h) es consecuencia inmediata de la propiedad anterior.

i) Por inducción sobre α . Es trivialmente cierto para $\alpha = 0$. Si vale para α , entonces todo $\beta \in L_{\alpha+1}[A] \cap \Omega$ cumple $\beta \subset L_\alpha[A] \cap \Omega = \alpha$, luego $\beta \leq \alpha$. Por otra parte,

$$\alpha = \{x \in L_\alpha[A] \mid (L_\alpha[A], A) \models [x] \text{ es un ordinal}\} \in \mathcal{P}D_A L_\alpha[A] = L_{\alpha+1}[A],$$

y también $\alpha \subset L_\alpha[A] \subset L_{\alpha+1}[A]$, luego $L_{\alpha+1}[A] \cap \Omega = \alpha + 1$. El caso límite es inmediato.

j) es inmediato a partir de la propiedad anterior.

k) La primera propiedad se demuestra trivialmente por inducción sobre α . Basta observar que si vale para α , entonces, como $A \cap L_\alpha[A] = \bar{A} \cap L_\alpha[A]$, tenemos que

$$L_{\alpha+1}[A] = \mathcal{P}D_A L_\alpha[A] = \mathcal{P}D_{\bar{A}} L_\alpha[A] = \mathcal{P}D_{\bar{A}} L_\alpha[\bar{A}] = L_{\alpha+1}[\bar{A}].$$

⁵Notemos que en KPI no podemos probar que exista el conjunto $\bar{A} = \{x \in A \mid x \in L[A]\}$, pues la fórmula $x \in L[A]$ es Σ_1 , pero no Δ_1 y no podemos aplicar Δ_1 -especificación. Por lo tanto, la existencia de \bar{A} debe tomarse como hipótesis.

La igualdad $L[\bar{A}] = L[A]$ es consecuencia inmediata de la propiedad que acabamos de probar. Para probar que $\bar{A} \in L[A]$ usamos que

$$\bigwedge x \in \bar{A} \bigvee \alpha x \in L_\alpha[A].$$

Como la fórmula $x \in L_\alpha[A]$ es Σ_1 , en KPI podemos usar Σ_1 -recolección para concluir que existe un ordinal β tal que

$$\bigwedge x \in \bar{A} \bigvee \alpha \in \beta x \in L_\alpha[A]$$

o, lo que es lo mismo, $\bar{A} \subset L_\beta[A]$. (En ZF podemos asociar a cada $x \in \bar{A}$ el mínimo α tal que $x \in L_\alpha[A]$ y aplicar el axioma de reemplazo para llegar a la misma conclusión.) Finalmente, por 3.3 c),

$$\bar{A} = L_\beta[A] \cap A \in \mathcal{P}\mathcal{D}_A L_\beta[A] = L_{\beta+1}[A] \subset L[A]. \quad \blacksquare$$

Ya hemos indicado que el término $L_\alpha[A]$ es Δ_1 en KPI. El apartado a) del teorema siguiente prueba lo mismo mediante un argumento general válido también en ZF–AP. El apartado b) aprovecha las comprobaciones del apartado precedente para extraer la máxima información posible sobre la complejidad de la definición de $L_\alpha[A]$. En esencia, afirma que $L_\alpha[A]$ es Δ_0 en un parámetro contenido en cualquier $L_\lambda[A]$ posterior, de modo que alguien que “viva” en $L_\lambda[A]$ tiene elementos suficientes para reconocer todos los $L_\alpha[A]$ con $\alpha < \lambda$. Se trata de un resultado técnico que el lector puede omitir en una primera lectura.⁶

Teorema 3.7 *Existe una fórmula $\phi(f, Y, \alpha, A)$ de tipo Δ_0 , en la que la variable A sólo aparece en subfórmulas de tipo $x \in A$, de modo que tanto en KPI como en ZF–AP se demuestra:*

- a) $Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee f \phi(f, Y, \alpha, A).$
- b) Si $\alpha < \lambda$ y $\lambda > \omega$, entonces $Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee f \in L_\lambda[A] \phi(f, Y, \alpha, A).$

DEMOSTRACIÓN: En la sección precedente hemos visto que

$$Y = \mathcal{P}\mathcal{D}_A X \leftrightarrow \bigvee H \psi(H, Y, X, A, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}, X^{<\omega}),$$

donde ψ es Δ_0 y, cuando se cumple esto, necesariamente $H = H_{X,A}$. También es fácil ver que A sólo aparece en subfórmulas de tipo $x \in A$ (pues sólo se usa para interpretar el relator adicional de \mathcal{L}_{tc}^+ como la pertenencia a A). Ahora,

$$\begin{aligned} Y = L_\alpha[A] &\leftrightarrow \bigvee h(h : \alpha + 1 \longrightarrow V \wedge h(0) = \emptyset \wedge \bigwedge \delta \in \alpha h(\delta + 1) = \mathcal{P}\mathcal{D}_A h(\delta) \\ &\quad \wedge \bigwedge \lambda \in \mathcal{D} h h(\lambda) = \bigcup_{\delta < \lambda} h(\delta) \wedge h(\alpha) = Y). \end{aligned}$$

⁶Para seguir los resultados básicos sobre constructibilidad, el lector que no esté familiarizado con KPI también puede omitir en una primera lectura incluso el apartado a) del teorema siguiente, y sustituirlo por la prueba elemental de que el término $L_\alpha[A]$ es absoluto para modelos transitivos de ZF–AP. Esto se demuestra trivialmente por inducción sobre α sin más que tener en cuenta que el término $\mathcal{P}\mathcal{D}_A X$ es absoluto, pues ya hemos visto que es Δ_1 .

La estructura de esta fórmula es la siguiente:

$$Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee hwcs(w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega} \wedge [\text{fórmula } \Delta_0] \wedge \bigwedge \delta \in \alpha$$

$$\bigvee HZ \bigvee X \in \mathcal{R}h(X = h(\delta) \wedge Z = X^{<\omega} \wedge \psi(H, h(\delta + 1), h(\delta), A, s, c, Z))).$$

La fórmula $Z = X^{<\omega}$ es Σ_1 , y concretamente [LM B.3] es de la forma

$$Z = X^{<\omega} \leftrightarrow \bigvee Pw(w = \omega \wedge [\text{fórmula } \Delta_0]),$$

donde, necesariamente, $P = \{X^n\}_{n \in \omega}$, luego

$$\begin{aligned} Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee hwcs(w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega} \wedge [\text{fórmula } \Delta_0] \wedge \\ \wedge \bigwedge \delta \in \alpha \bigvee HZP([\text{fórmula } \Delta_0])), \end{aligned}$$

de modo que, si se cumple esto, necesariamente las variables no acotadas son

$$\begin{aligned} h = \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}, \quad w = \omega, \quad c = \omega^{<\omega}, \quad s = (\omega^{<\omega})^{<\omega}, \quad H = H_{L_\delta[A], A}, \\ Z = L_\delta[A]^{<\omega}, \quad P = \{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}. \end{aligned}$$

Más aún, la variable Z sólo se ha introducido para acotar variables, por lo que sólo aparece en la fórmula en cuantificaciones de tipo $\bigwedge x \in Z$ o bien $\bigvee x \in Z$, las cuales pueden sustituirse por

$$\bigwedge n \in w \bigwedge x \in P(n), \quad \bigvee n \in w \bigvee x \in P(n),$$

por lo que podemos eliminar la variable Z y así llegamos a que

$$\begin{aligned} Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee hwcs(w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega} \wedge [\text{fórmula } \Delta_0] \wedge \\ \wedge \bigwedge \delta \in \alpha \bigvee HP([\text{fórmula } \Delta_0])). \end{aligned}$$

La única razón por la que no podemos decir que esta fórmula es Σ_1 es la presencia del cuantificador $\bigwedge \delta \in \alpha$, que nos impide extraer las variables H y P (en KPI esto no sería un inconveniente). Pero podemos hacer lo siguiente:

$$\begin{aligned} Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee hwcsF(w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega} \wedge [\text{fórmula } \Delta_0] \wedge \\ F : \alpha \longrightarrow V \wedge \bigwedge \delta \in \alpha \bigvee Q \in F(\delta) \bigvee HP \in Q(F(\delta) = (H, P) \wedge [\text{fórmula } \Delta_0])), \end{aligned}$$

de modo que

$$Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee hwcsF(w = \omega \wedge c = w^{<\omega} \wedge s = c^{<\omega} \wedge [\text{fórmula } \Delta_0]),$$

donde, si se cumple esto, necesariamente

$$h = \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}, \quad w = \omega, \quad c = \omega^{<\omega}, \quad s = (\omega^{<\omega})^{<\omega},$$

$$F = \{(H_{L_\delta[A], A}, \{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega})\}_{\delta < \alpha}.$$

Usando de nuevo la expresión de $y = x^{<\omega}$ como fórmula Σ_1 esto se reduce a

$$Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee hwpqF([\text{fórmula } \Delta_0]),$$

donde, necesariamente, $p = \{\omega^n\}_{n \in \omega}$, $q = \{(\omega^{<\omega})^n\}_{n \in \omega}$, lo que a su vez nos da una expresión de la forma

$$Y = L_\alpha[A] \leftrightarrow \bigvee f([\text{fórmula } \Delta_0]),$$

donde necesariamente f es

$$(\omega, \{\omega^n\}_{n \in \omega}, \{(\omega^{<\omega})^n\}_{n \in \omega}, \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}, \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \alpha}, \{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha}).$$

Con esto queda probado el apartado a) y, si llamamos f_α a la séxtupla anterior, para probar b) basta demostrar que si $\lambda > \alpha$ y $\lambda > \omega$, entonces $f_\alpha \in L_\lambda[A]$.

En primer lugar, observamos que si $x, y \in L_\delta[A]$, entonces

$$\{x, y\} \in \mathcal{PDL}_\delta[A] = L_{\delta+1}[A],$$

luego $(x, y) = \{\{x\}, \{x, y\}\} \in L_{\delta+2}[A]$, luego $L_\lambda[A]$ es cerrado para pares ordenados, luego para ternas $(x, y, z) = ((x, y), z)$, y repitiendo el proceso llegamos a que es cerrado para séxtuplas ordenadas. Por lo tanto, basta comprobar que las seis componentes están en $L_\lambda[A]$.

La primera es trivial, pues $\omega \in L_{\omega+1}[A] \subset L_\lambda[A]$.

Para la segunda observamos que $\omega^n \subset L_\omega[A]$ y es claramente definible, luego $\omega^n \in L_{\omega+1}[A]$, luego $(n, \omega^n) \in L_{\omega+3}[A]$, luego $\{\omega^n\}_{n \in \omega} \in L_{\omega+4}[A] \subset L_\lambda[A]$.

Para la tercera observamos que $(\omega^{<\omega})^n \subset L_\omega[A]$, luego $(\omega^{<\omega})^n \in L_{\omega+1}[A]$ y concluimos como en el caso anterior.

Admitamos de momento que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha} \in L_\lambda[A]$ y veamos que también $\{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha} \in L_\lambda[A]$.

Sea $\alpha < \epsilon < \lambda$ tal que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha} \in L_\epsilon[A]$. Por transitividad $L_\delta[A] \in L_\epsilon[A]$, luego $n \times L_\delta[A] \subset L_{\epsilon+2}[A]$, luego $L_\delta[A]^n \subset L_{\epsilon+3}[A]$, pues cada elemento de $L_\delta[A]^n$ es un subconjunto finito de $L_{\epsilon+2}[A]$. A su vez

$$L_\delta[A]^n = \{s \in L_{\epsilon+3}[A] \mid s : n \longrightarrow L_\delta[A]\} \in L_{\epsilon+4}[A],$$

porque la fórmula que especifica el subconjunto es Δ_0 (con parámetros n y $L_\delta[A]$), luego equivale a su relativización a $L_{\epsilon+3}[A]$. Esto implica a su vez que $(n, L_\delta[A]^n) \in L_{\epsilon+6}[A]$, luego $\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega} \subset L_{\epsilon+6}[A]$, pero claramente este conjunto es definible en $L_{\epsilon+6}[A]$ con parámetros $L_\delta[A]$ y ω , y así resulta que $\{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha} \in L_{\epsilon+7}[A]$. A su vez, $(\delta, \{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha}) \in L_{\epsilon+9}[A]$, luego

$$\{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha} \subset L_{\epsilon+9}[A].$$

Por último, concluimos que $\{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha} \in L_{\epsilon+10}[A]$ porque se trata de un subconjunto definible de $L_{\epsilon+9}[A]$ con parámetros ω , α y $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}$. En efecto, informalmente, la definición es:

$\{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha}$ es el conjunto de todos los $x \in L_{\epsilon+9}[A]$ tales que existen $\delta, y \in L_{\epsilon+9}[A]$ de modo que $x = (\delta, y)$, $\delta \in \alpha$, $y : \omega \longrightarrow V$ y, para cada $n \in \omega$, para todo $s \in L_{\epsilon+9}[A]$ se cumple $s \in y(n)$ si y sólo si s es una aplicación de n en el δ -ésimo elemento de $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}$.

Ahora sólo falta demostrar que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}, \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \alpha} \in L_\lambda[A]$ para todo $\alpha < \lambda$. Realizamos una doble inducción: suponemos que el resultado es cierto para todo ordinal límite distinto de ω menor que λ , y tenemos que probarlo para λ , y a su vez suponemos que el resultado es cierto para todo $\delta < \alpha$, y tenemos que probarlo para α .

El caso $\alpha = 0$ es trivial. Si vale para α , es decir, si tenemos que

$$\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}, \quad \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \alpha} \in L_\lambda[A],$$

entonces, puesto que $L_\alpha[A] \in L_\lambda[A]$, también $\{(\alpha, L_\alpha[A])\} \in L_\lambda[A]$. Ahora bien, es claro que si $x, y \in L_\epsilon[A]$, entonces $x \cup y \in L_{\epsilon+1}[A]$, luego concluimos que

$$\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha+1} = \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha} \cup \{(\alpha, L_\alpha[A])\} \in L_\lambda[A].$$

Por el mismo argumento, basta probar que $H_{L_\alpha[A], A} \in L_\lambda[A]$. Tenemos que

$$H_{L_\alpha[A], A} : \omega^{<\omega} \times L_\alpha[A]^{<\omega} \longrightarrow 2.$$

Sabemos que $L_\alpha[A] \in L_\lambda[A]$, y hemos visto más arriba que esto implica que $\{L_\alpha[A]^n\}_{n \in \omega} \in L_\lambda[A]$, luego $L_\alpha[A]^{<\omega} \in L_\lambda[A]$, pues este conjunto es definible a partir del anterior. Por consiguiente $H_{L_\alpha[A], A} \subset L_\epsilon[A]$, para cierto $\epsilon < \lambda$. Podemos suponer que $L_\epsilon[A]$ contiene a $\omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}$ y a $\text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$, que se especifica mediante una fórmula Δ_0 con los parámetros indicados.

Veamos que para toda $\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$ existe un conjunto $C \subset \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$, cerrado para subfórmulas que contiene a α y de modo la restricción de $H_{L_\alpha[A], A}$ a $C \times L_\alpha[A]^{<\omega}$ está en $L_{\epsilon+1}[A]$. Lo probamos por inducción sobre la longitud de α .

Si α es atómica, por ejemplo de tipo Rx_i , basta tomar $C = \{\alpha\}$ y

$$H = \{x \in L_\epsilon[A] \mid L_\epsilon[A] \models \forall v k(v \in [L_\alpha[A]]^{<\omega} \wedge k \in [2] \wedge x = ([\alpha], v, k)) \wedge$$

$$([i] \notin \mathcal{D}v \wedge k = 1) \vee ([i] \in \mathcal{D}v \wedge (k = 1 \leftrightarrow Rv([i])))\} \in L_{\epsilon+1}[A].$$

Dejamos al lector los casos $x_i = x_j$ y $x_i \in x_j$, similares al que acabamos de ver, así como los casos $\alpha = \neg\beta$ y $\alpha = \beta \rightarrow \gamma$, que son similares al último: $\alpha = \bigwedge x_i \beta$.

Por hipótesis de inducción existe un conjunto C cerrado para subfórmulas que contiene a β y la restricción H de $H_{L_\alpha[A], A}$ a $C \times L_\alpha[A]^{<\omega}$ está en $L_{\epsilon+1}[A]$. Existe, por tanto, $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$ y $s \in L_\epsilon[A]^{<\omega}$ de modo que

$$H = \{x \in L_\epsilon[A] \mid L_\epsilon[A] \models \phi[x, s]\}.$$

Sea n el menor natural mayor que los índices de todas las variables libres en α . Observamos que $C' = C \cup \{\alpha\}$ es cerrado para subfórmulas y podemos considerar

$$\begin{aligned} H' = \{x \in L_\epsilon[A] \mid L_\epsilon[A] \models \phi[x, s] \vee \forall v k(v \in [L_\alpha[A]^{<\omega}] \wedge k \in [2] \wedge \\ x = ([\alpha], v, k) \wedge ([n] \not\subset \mathcal{D}v \wedge k = 1) \vee ([n] \subset \mathcal{D}v \wedge \\ (k = 1 \leftrightarrow \bigwedge a w(a \in [L_\alpha[A]] \wedge w = v_{[i]}^a \rightarrow \phi([\beta], w, 1), s)))\} \in L_{\epsilon+1}[A], \end{aligned}$$

que es la restricción de $H_{L_\alpha[A], A}$ a $C' \times L_\alpha[A]^{<\omega}$.

Con esto ya podemos probar que $H_{L_\alpha[A], A} \in L_{\epsilon+2}[A] \subset L_\lambda[A]$, pues

$$\begin{aligned} H_{L_\alpha[A], A} = \{x \in L_{\epsilon+1}[A] \mid L_{\epsilon+1}[A] \models \forall \alpha v k(\alpha \in [\omega^{<\omega}] \wedge v \in [L_\alpha[A]^{<\omega}] \wedge \\ k \in [2] \wedge ((\alpha \notin \text{Form}(\mathcal{L}_{tc}^+)) \wedge k = [1]) \vee (\alpha \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc}^+) \wedge \\ \bigvee H C(\alpha \in C \wedge \Phi_{L_\alpha[A], A}^C \wedge H(\alpha, v) = k)))\}, \end{aligned}$$

donde $\Phi_{L_\alpha[A], A}^C$ es la fórmula Δ_0 dada por⁷ el teorema 1.3, con parámetros ω , $\omega^{<\omega}$, $(\omega^{<\omega})^{<\omega}$ y $L_\alpha[A]^{<\omega}$.

Esto termina el segundo paso de la inducción, y falta considerar el caso en que α es un ordinal límite. La hipótesis de inducción es que para todo $\beta < \alpha$ se cumple que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \beta}, \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \beta} \in L_\lambda[A]$. Si $\alpha \neq \omega$ la hipótesis de inducción sobre λ nos da que, de hecho, $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \beta}, \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \beta} \in L_\alpha[A]$. En particular, tenemos que existe un $\epsilon < \lambda$ (en este caso $\epsilon = \alpha$) de modo que, para todo $\beta < \alpha$ se cumple que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \beta}, \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \beta} \in L_\epsilon[A]$. Vamos a ver que esto también es cierto si $\alpha = \omega$.

Ciertamente, si $\beta < \omega$ tenemos que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \beta} \in L_\omega[A]$, pues se trata de un conjunto finito. Por el mismo motivo, si $\delta < \beta < \omega$ tenemos que $L_\delta[A] \in L_\omega[A]$, $L_\delta[A]^{<\omega} \in L_{\omega+1}[A]$. Por otra parte, $\omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega} \in L_{\omega+1}[A]$ y además $\text{Form}^+(\mathcal{L}_{tc}) \in L_{\omega+2}[A]$. Bajo estas hipótesis hemos demostrado antes que $H_{L_\delta[A], A} \in L_{\omega+4}[A]$, luego $\{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \beta} \in L_{\omega+7}[A]$, pues cada $H_{L_\delta[A], A}$ es definible mediante una fórmula Δ_0 con parámetros disponibles en $L_{\omega+6}[A]$.

Volviendo al caso en que α es un límite arbitrario, según acabamos de probar, existe $\alpha + 1 < \epsilon < \lambda$ tal que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \beta} \in L_\epsilon[A]$. Antes hemos visto que esto implica que

$$\{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \beta} \in L_{\epsilon+10}[A],$$

luego la séxtupla f_β que define a $L_\beta[A]$ cumple $f_\beta \in L_{\epsilon+k}[A]$, para un cierto $k \in \omega$, el mismo para todo $\beta < \alpha$.

Con esto ya podemos concluir que $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha} \in L_{\epsilon+k+1}[A]$, pues

$$\begin{aligned} \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha} = \{x \in L_{\epsilon+k}[A] \mid L_{\epsilon+k}[A] \models \forall \delta Y f(\delta \in [\alpha + 1]) \wedge \\ x = (\delta, Y) \wedge \phi(f, Y, \delta)\}, \end{aligned}$$

donde ϕ es la fórmula Δ_0 del enunciado salvo que cambiamos las subfórmulas

⁷La única variación es que hay que omitir la relación R que interpreta al relator de pertenencia, porque aquí estamos considerando modelos naturales, y hay que añadir en ella la interpretación de las fórmulas atómicas de \mathcal{L}_{tc}^+ de tipo Rx .

$x \in A$ por Rx . De aquí se sigue a su vez que $\{L_\delta[A]^{<\omega}\}_{\delta < \alpha} \in L_{\epsilon+k+2}[A]$, y entonces

$$\begin{aligned} \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \alpha} &= \{x \in L_{\epsilon+k+2}[A] \mid L_{\epsilon+k+2}[A] \models \forall \delta HST(x = (\delta, H) \wedge \\ &\quad \delta \in [\alpha] \wedge S = [\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}] \wedge T = [\{L_\delta[A]^{<\omega}\}_{\delta < \alpha}] \\ &\quad \wedge \phi(S(\delta), H, T(\delta), [\omega], [\omega^{<\omega}], [(\omega^{<\omega})^{<\omega}]\}, \end{aligned}$$

donde ϕ es la fórmula Δ_0 que determina a $H_{L_\delta[A], A}$ con los parámetros indicados. Por lo tanto $\{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \alpha} \in L_\lambda[A]$. ■

En particular, ahora es inmediato que el término $L_\alpha[A]$ es Δ_1 (tanto en KPI como en ZF–AP o en cualquier extensión de estas teorías) y que la clase $L[A]$ es Σ_1 (en el sentido de que lo es la fórmula $x \in L[A]$, es decir, la propiedad “ser constructible respecto de A ”).

3.3 El axioma de constructibilidad

En la sección precedente hemos definido la clase L de los conjuntos constructibles, y la pregunta obligada es ahora si existen conjuntos no constructibles. La respuesta es que la existencia de conjuntos no constructibles no puede ser demostrada ni refutada en ZFC, lo que lleva a considerar el

Axioma de constructibilidad ($V = L$) $\bigwedge x \bigvee \alpha x \in L_\alpha$.

Observemos que se trata de una sentencia Π_2 . Afirmar, como acabamos de hacer, que no es posible demostrar que existen conjuntos no constructibles equivale a demostrar que $V = L$ es consistente con los axiomas de ZFC, y esto se debe a su vez a que L es un modelo transitivo de $ZFC + V = L$. El primer paso para probarlo es el siguiente:

Teorema 3.8 En ZF (resp. KPI, ZF–AP) se demuestra que $L[A]$ es un modelo transitivo de ZF (resp. KPI, ZF–AP).

DEMOSTRACIÓN: Razonamos en primer lugar en ZF–AP. Sabemos que $L[A]$ cumple los axiomas de extensionalidad y de regularidad simplemente por ser una clase transitiva. El axioma del par se cumple porque si $x, y \in L[A]$, existe un α tal que $x, y \in L_\alpha[A]$, luego $\{x, y\} \in L_{\alpha+1}[A] \subset L[A]$, porque todo conjunto finito es definible.

Para probar el axioma de la unión observamos que si $x \in L[A]$ existe un α tal que $x \in L_\alpha[A]$, luego $x \subset L_\alpha[A]$ y $\bigcup x \subset L_\alpha[A]$ por transitividad, y entonces

$$\bigcup x = \{u \in L_\alpha[A] \mid (\bigvee v(u \in v \wedge v \in x))^{L_\alpha[A]}\} \in \mathcal{P}D_A L_\alpha[A] = L_{\alpha+1}[A] \subset L[A].$$

Para probar el axioma de reemplazo tomamos $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n)$, fijamos $x_1, \dots, x_n \in L[A]$, suponemos que

$$\bigwedge xyz(\phi^{L[A]}(x, y) \wedge \phi^{L[A]}(x, z) \rightarrow y = z)$$

y fijamos un $a \in L[A]$. Tenemos que probar que

$$b = \{y \in L[A] \mid \forall x \in a \phi^{L[A]}(x, y)\} \in L[A].$$

Notemos que el conjunto b existe por el axioma de reemplazo aplicado a la fórmula $\phi^{L[A]}$. Podemos considerar la función $f : b \rightarrow \Omega$ tal que $f(y)$ es el mínimo δ tal que $y \in L_\delta[A]$. Como $f[b]$ es un subconjunto de Ω , está acotado.

Sea α tal que $x_1, \dots, x_n, a \in L_\alpha[A]$ y $f[b] \subset \alpha$, de modo que $b \subset L_\alpha[A]$. Ahora aplicamos la versión general del teorema de reflexión [LM 12.28], que nos da un ordinal $\lambda > \alpha$ tal que

$$\lambda x_1 \cdots x_n xy \in L_\lambda[A] (\phi^{L_\lambda[A]}(x, y, x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \phi^{L[A]}(x, y, x_1, \dots, x_n)).$$

En particular resulta que

$$b = \{y \in L_\lambda[A] \mid \forall x \in a \phi^{L_\lambda[A]}(x, y)\} = \{y \in L_\lambda[A] \mid (\forall x \in a \phi(x, y))^{L_\lambda[A]}\},$$

luego $b \in \mathcal{PD}_A L_\lambda[A] = L_{\lambda+1}[A] \subset L[A]$.

El axioma de infinitud se cumple porque $\omega \in L[A]$.

Si además suponemos el axioma de partes, podemos probar que también se cumple en $L[A]$. Para ello tomamos $x \in L[A]$. Como en la prueba del axioma de reemplazo razonamos que existe un α tal que $x \in L_\alpha[A]$ y $\mathcal{P}x \cap L[A] \subset L_\alpha[A]$. Entonces

$$\mathcal{P}x \cap L[A] = \{u \in L_\alpha[A] \mid u \subset x\} \in \mathcal{PD}_A L_\alpha[A] = L_{\alpha+1}[A] \subset L[A].$$

Veamos ahora las variantes que requiere la prueba en KPI. Las pruebas de los axiomas de extensionalidad, par y unión valen igualmente. Para el axioma de regularidad tomamos una fórmula $\phi(u, x_1, \dots, x_n)$, fijamos $x_1, \dots, x_n \in L[A]$ y se trata de probar que

$$\forall u \in L[A] \phi^{L[A]}(u) \rightarrow \forall u \in L[A] (\phi^{L[A]}(u) \wedge \forall v \in u \neg \phi^{L[A]}(v)),$$

pero esto es el axioma de regularidad para la fórmula $u \in L[A] \wedge \phi^{L[A]}(u)$.

La relativización del axioma de Δ_0 -especificación es

$$\lambda x_1 \cdots x_n x \in L[A] \{u \in x \mid \phi(u, x_1, \dots, x_n)\} \in L[A],$$

donde ϕ es una fórmula Δ_0 (y por eso no la hemos relativizado a $L[A]$). Basta tomar un α tal que $x_1, \dots, x_n, x \in L_\alpha[A]$, y entonces

$$\begin{aligned} \{u \in x \mid \phi(u, x_1, \dots, x_n)\} &= \{u \in L_\alpha[A] \mid (u \in x \wedge \phi(u))^{L_\alpha[A]}\} \in \mathcal{PD}_A L_\alpha[A] \\ &= L_{\alpha+1}[A] \subset L[A]. \end{aligned}$$

Por último, la relativización del axioma de Δ_0 -recolección es

$$\lambda u \in L[A] \forall v \in L[A] \phi(u, v) \rightarrow \lambda a \in L[A] \forall b \in L[A] \lambda u \in a \forall v \in b \phi(u, v).$$

Si suponemos el antecedente del implicador y fijamos $a \in L[A]$, tenemos también que

$$\bigwedge u \in a \bigvee \alpha \bigvee v (\alpha \in \Omega \wedge v \in L_\alpha[A] \wedge \phi(u, v)).$$

Esto nos permite aplicar el teorema de Σ_1 -recolección [LM 6.17] a la fórmula tras $\bigvee \alpha$, lo que nos da que existe un y tal que

$$\bigwedge u \in a \bigvee \alpha \in y \bigvee v (\alpha \in \Omega \wedge v \in L_\alpha[A] \wedge \phi(u, v)).$$

Tomamos $\beta = \bigcup (y \cap \Omega)$, que es un ordinal tal que

$$\bigwedge u \in a \bigvee \alpha < \beta \bigvee v (v \in L_\alpha[A] \wedge \phi(u, v)),$$

o también $\bigwedge u \in a \bigvee v \in L_\beta[A] \phi(u, v)$, luego se cumple la relativización del axioma de Δ_0 -recolección con $b = L_\beta[A]$. ■

Ahora hay que tener cuidado de no pecar de ingenuos: trabajando, por ejemplo, en ZF, tenemos que la clase L es un modelo de ZF y, obviamente, todos los elementos de L son conjuntos constructibles, pero esto no significa que L satisfaga el axioma de constructibilidad. Lo cierto es que sí que lo satisface, pero probar que es así no es limitarse a observar que todos los elementos de L son constructibles, sino que hay que probar que todos son constructibles ^{L} . El teorema siguiente prueba mucho más:

Teorema 3.9 (ZF) *Sea M un modelo transitivo de KPI (resp. de ZF–AP.) Entonces:*

a) *Si M es una clase propia, se cumple que $L \subset M$ y*

$$\bigwedge x \in M (x \text{ es constructible}^M \leftrightarrow x \text{ es constructible}).$$

En particular, la clase L es un modelo transitivo de $ZF + V = L$ y es el único que es una clase propia.

b) *Si M es un conjunto y $\lambda = \Omega^M$, entonces $L_\lambda \subset M$ y*

$$\bigwedge x \in M (x \text{ es constructible}^M \leftrightarrow x \in L_\lambda).$$

En particular, si un conjunto M es un modelo transitivo de KPI + $V = L$ (resp. ZF–AP + $V = L$), entonces $M = L_\lambda$, con $\lambda = \Omega^M$.

DEMOSTRACIÓN: Como el término L_α es Δ_1 , es absoluto para modelos transitivos de KPI (o ZF–AP), luego si $\alpha \in M$, tenemos que $L_\alpha = L_\alpha^M \in M$, luego $L_\alpha \subset M$.

Si M es una clase propia, entonces $\Omega \subset M$ (por 2.10), luego todo $L_\alpha \subset M$, luego $L \subset M$.

En cambio, si M es un conjunto y $\lambda = \Omega^M$, para cada $\alpha < \lambda$ tenemos que $L_\alpha \subset M$, luego $L_\lambda = \bigcup_{\alpha < \lambda} L_\alpha \subset M$.

Como en KPI (o ZF–AP) se demuestra que $\bigwedge x(x \in L \leftrightarrow \bigvee \alpha x \in L_\alpha)$, en M tiene que cumplirse la relativización de esta sentencia, es decir,

$$\bigwedge x \in M(x \in L^M \leftrightarrow \bigvee \alpha \in M x \in L_\alpha).$$

Si M es una clase propia $\Omega \subset M$ y esto equivale a

$$\bigwedge x \in M(x \in L^M \leftrightarrow \bigvee \alpha x \in L_\alpha),$$

que es la parte a) del enunciado. Si M es un conjunto esto equivale a

$$\bigwedge x \in M(x \in L^M \leftrightarrow \bigvee \alpha < \lambda x \in L_\alpha),$$

lo cual equivale a la parte b).

En particular, aplicando a) a $M = L$ concluimos que todo elemento de L es constructible ^{L} , luego L es un modelo transitivo de $ZF + V = L$. Por último, si un conjunto M es un modelo transitivo de $KPI + V = L$ (o $KPI + V = L$), el apartado b) nos da que $M = L_\lambda$. ■

Algunas observaciones:

- La hipótesis de que M es un modelo de KPI (o ZF–AP) debe entenderse como que existe un conjunto finito de axiomas de KPI (o de ZF) tales que todo modelo que los cumpla cumple el teorema. Concretamente, son los axiomas necesarios para demostrar la equivalencia de $Y = L_\alpha$ con una fórmula Σ_1 y otra Π_1 , para que se cumpla el teorema 2.10 y cada resultado que hemos aplicado a M por ser un modelo de la teoría correspondiente.
- Vemos en particular que L es el menor modelo interno de ZF, y el único modelo interno de $ZF + V = L$.
- Hemos visto que ser constructible es absoluto para modelos internos, pero no lo es necesariamente para modelos transitivos que sean conjuntos. La idea es que para “construir” conjuntos se necesitan ordinales, y en un modelo que M sea un conjunto podemos encontrar un $x \in M \setminus L_\lambda$ que sea constructible pero que, para “ser construido” requiera más ordinales que los que hay en M , con lo que alguien que “viva” en M no lo reconocerá como constructible. En cambio, en un modelo interno M todos los ordinales están disponibles, por lo que si un conjunto es constructible, alguien que “viva” en M siempre puede construirlo y reconocerlo como tal.

Pero la consecuencia más importante a la que llegamos en virtud del teorema anterior es:

Teorema 3.10 *Si ZF es consistente, también lo es ZF + V = L.*

Esto es consecuencia inmediata de que L es un modelo de $ZF + V = L$. La prueba es totalmente constructiva. Recordemos el argumento general: si alguien pudiera demostrar una contradicción en $ZF + V = L$, relativizando la prueba

a L , obtendríamos una demostración de una contradicción en ZF (y el proceso de construcción de una prueba a partir de la otra es totalmente mecánico).

Más informalmente, si en un argumento que pruebe $0 \neq 0$ en ZF a partir de “todo conjunto es constructible” relativizamos cambiando sistemáticamente la palabra “conjunto” por “conjunto constructible” obtenemos una prueba de $0 \neq 0$ en ZF a partir de “todo conjunto constructible es constructible”, luego ZF resultaría ser contradictorio.

Desde un punto de vista semántico, no es posible demostrar la existencia de conjuntos no constructibles porque si en un modelo de ZF en el que los haya los eliminamos y nos quedamos únicamente con los conjuntos constructibles, se siguen cumpliendo todos los axiomas de ZF (y además todo conjunto es constructible), luego a partir de tales axiomas no se puede probar la existencia de un conjunto no constructible.

Hemos enunciado el teorema 3.9 para $A = \emptyset$ por simplicidad, pero el argumento que lo demuestra vale en general para probar lo siguiente:

Teorema 3.11 *Sea A un conjunto tal que $A \in L[A]$. Entonces, si M es un modelo transitivo de KPI (o ZF–AP) y $A \in M$, entonces, o bien M es una clase propia y $L[A] \subset M$, o bien M es un conjunto y $L_\lambda[A] \subset M$, donde $\lambda = \Omega^M$. Además en el primer caso $L[A]^M = L[A]$, y en el segundo $L[A]^M = L_\lambda[A]$.*

De hecho, el teorema 3.7 nos permite probar un resultado más fuerte:

Teorema 3.12 *Si A es un conjunto y M es un conjunto transitivo tal que $(M, A) \equiv (L_\lambda[A], A)$, para un cierto $\lambda > \omega$, entonces $M = L_{\lambda'}[A]$, donde $\lambda' = \Omega^M$.*

DEMOSTRACIÓN: Llamamos $\phi(f, Y, \alpha) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$ a la fórmula correspondiente a la fórmula dada por el teorema 3.7 en la que se sustituyen las subfórmulas $x \in A$ por Rx . Así, si $\alpha < \lambda$,

$$\begin{aligned} Y = L_\alpha[A] &\leftrightarrow \forall f \in L_\lambda[A] \phi(f, Y, \alpha, A) \leftrightarrow \forall f \in L_\lambda[A] L_\lambda[A] \models \phi[f, Y, \alpha] \\ &\leftrightarrow L_\lambda[A] \models \forall f \phi[Y, \alpha]. \end{aligned}$$

Ahora,

$$L_\lambda[A] \models \bigwedge \alpha \bigvee Y f \phi(f, Y, \alpha),$$

luego lo mismo cumple M , y esto significa que $\bigwedge \alpha \in \Omega^M \bigvee Y f \in M \phi(f, Y, \alpha, A)$, luego $\bigwedge \alpha \in \lambda' L_\alpha[A] \in M$, luego $L_{\lambda'}[A] \subset M$. Por otra parte,

$$L_{\lambda'}[A] \models \bigwedge x \bigvee \alpha Y f (x \in Y \wedge \phi(f, y, \alpha)),$$

y como M debe cumplir lo mismo, tenemos que $\bigwedge x \in M \bigvee \alpha \in \Omega^M x \in L_\alpha[A]$, luego $M = L_{\lambda'}[A]$. ■

Acabamos de ver que en ZF no puede demostrarse la existencia de conjuntos no constructibles, pero cabría plantearse si con el axioma de elección podríamos obtener ejemplos. La respuesta no sólo es negativa, sino que, como ya habíamos indicado, ¡el axioma de constructibilidad implica el axioma de elección! Lo demostramos en la sección siguiente.

3.4 El buen orden constructible

No podemos demostrar la existencia de funciones de elección o buenos órdenes sobre conjuntos arbitrarios, sino que necesitamos el axioma de elección para postular su existencia. Sin embargo, si consideramos conjuntos constructibles la situación es muy distinta. Cada conjunto generado por el operador $\mathcal{P}Dx$ está perfectamente “etiquetado” por una fórmula y una sucesión de parámetros, lo que permite “catalogar” los conjuntos constructibles y ordenarlos sin necesidad del axioma de elección:

Definición 3.13 Para cada conjunto A definimos

$$\begin{aligned}\trianglelefteq_{A,0} &= \emptyset \wedge \bigwedge \alpha \trianglelefteq_{A,\alpha+1} = (\trianglelefteq_{A,\alpha})_{L_\alpha[A], A} \wedge \bigwedge \lambda \trianglelefteq_{A,\lambda} = \bigcup_{\delta < \lambda} \trianglelefteq_{A,\delta}, \\ \trianglelefteq_A &= \bigcup_{\alpha} \trianglelefteq_{A,\alpha}.\end{aligned}$$

Aquí estamos considerando el término $\leq_{M,A}$ dado por el teorema 3.4. Es inmediato que esta definición recurrente es correcta en ZF–AP. Por otra parte, como $\leq_{M,A}$ es Δ_1 , exactamente el mismo razonamiento empleado para la sucesión transfinita $\{L_\alpha[A]\}_{\alpha \in \Omega}$ prueba que el término $\trianglelefteq_{A,\alpha}$ es definible en KPI y es Δ_1 , por lo que la fórmula

$$x \trianglelefteq_A y \equiv \bigvee z \alpha (\alpha \in \Omega \wedge x \in L_\alpha[A] \wedge y \in L_\alpha[A] \wedge z = \trianglelefteq_{A,\alpha} \wedge (x, y) \in z)$$

es Σ_1 (respecto a KPI). Luego veremos que también lo es respecto a ZF–AP.

En ambos casos, una simple inducción a partir de 3.4 nos da que $\trianglelefteq_{A,\alpha}$ es un buen orden en $L_\alpha[A]$ tal que si $\alpha < \beta$ entonces $L_\alpha[A]$ es una sección inicial de $L_\beta[A]$. Por lo tanto:

Teorema 3.14 *Para todo conjunto A , la fórmula $x \trianglelefteq_A y$ determina un buen orden de $L[A]$ tal que*

$$\bigwedge \alpha \beta xy (\alpha < \beta \wedge x \in L_\alpha[A] \wedge y \in L_\beta[A] \setminus L_\alpha[A] \rightarrow x \triangleleft_A y).$$

Por consiguiente, si suponemos $V = L[A]$, el buen orden \trianglelefteq_A nos permite definir una función de elección sobre cualquier conjunto. Así pues:

Teorema 3.15 $\bigvee A V = L[A] \rightarrow \text{AE}$.

En particular (razonando en ZF), la clase $L[A]$ resulta ser un modelo transitivo de ZFC (puesto que $L[A] \models V = L[\bar{A}]$, donde $\bar{A} = A \cap L[A]$). Más en particular:

Teorema 3.16 *Si ZF es consistente, también lo es ZFC.*

En efecto, tenemos que $V = L \rightarrow \text{AE}$, y hemos probado que si ZF es consistente, también lo es $\text{ZF} + V = L$, luego en particular lo es ZFC.

Observaciones Hay quien dice que el axioma de elección introduce conjuntos “extraños” en la teoría (funciones de elección y conjuntos construidos a partir de ellas) de los que no tenemos ninguna descripción concreta, pero ahora vemos que sólo necesitamos recurrir al axioma de elección para introducir “conjuntos extraños” en la medida en que admitamos la posibilidad de estar tratando ya con conjuntos “extraños” (no constructibles). Si sólo consideramos conjuntos constructibles, el axioma de elección es un teorema. ■

Ahora probamos el análogo del teorema 3.7 para el buen orden constructible, que en particular proporciona un argumento para probar que el término $\trianglelefteq_{A,\alpha}$ es Σ_1 , tanto en KPI como en ZF–AP.

Teorema 3.17 *Existe una fórmula $\psi(f, Y, \alpha, A)$ de tipo Δ_0 , en la que la variable A sólo aparece en subfórmulas de tipo $x \in A$, de modo que tanto en KPI como en ZF–AP se demuestra:*

- a) $Y = \trianglelefteq_{A,\alpha} \leftrightarrow \bigvee f \psi(f, Y, \alpha, A).$
- b) *Si $\alpha < \lambda$ y $\lambda > \omega$, entonces $Y = \trianglelefteq_{A,\alpha} \leftrightarrow \bigvee f \in L_\lambda[A] \psi(f, Y, \alpha, A).$*

DEMOSTRACIÓN: Hemos visto que

$$R = \leq_{X,A} \leftrightarrow \psi(R, X, A, \leq, H_{X,A}, X^{<\omega}, \mathcal{P}D_AX, \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega}),$$

donde la fórmula ψ es Δ_0 . Por lo tanto,

$$\begin{aligned} S = \trianglelefteq_{A,\alpha} &\leftrightarrow \bigvee h(h : \alpha + 1 \longrightarrow V \wedge h(0) = \emptyset \wedge \bigwedge \delta \in \alpha h(\delta + 1) = h(\delta)_{L_\delta[A],A} \\ &\wedge \bigwedge \lambda \in \mathcal{D}h h(\lambda) = \bigcup_{\delta < \lambda} h(\delta) \wedge h(\alpha) = S). \end{aligned}$$

Vemos, pues, que

$$\begin{aligned} S = \trianglelefteq_{A,\alpha} &\leftrightarrow \bigvee h([\text{fórmula } \Delta_0] \wedge \bigwedge \delta \in \alpha \\ &\psi(h(\delta + 1), L_\delta[A], A, h(\delta), H_{L_\delta[A],A}, L_\delta[A]^{<\omega}, L_{\delta+1}[A], \omega, \omega^{<\omega}, (\omega^{<\omega})^{<\omega})). \end{aligned}$$

Como $L_\delta[A]^{<\omega}$ sólo aparece en acotaciones de la forma $\bigwedge x \in L_\delta[A]^{<\omega}$ o $\bigvee x \in L_\delta[A]^{<\omega}$, podemos transformarlas en la forma $\bigwedge n \in \omega \bigwedge x \in L_\delta[A]^n$ y $\bigvee n \in \omega \bigvee x \in L_\delta[A]^n$, y lo mismo vale para $\omega^{<\omega}$ y $(\omega^{<\omega})^{<\omega}$, que pueden reemplazarse por términos ω^n y $(\omega^{<\omega})^n$. Por lo tanto,

$$\begin{aligned} S = \trianglelefteq_{A,\alpha} &\leftrightarrow \bigvee h f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 ([f_1 = \omega \wedge f_2 = \{\omega^n\}_{n \in \omega} \wedge \\ &f_3 = \{(\omega^{<\omega})^n\}_{n \in \omega} \wedge f_4 = \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha} \wedge f_5 = \{H_{L_\delta[A],A}\}_{\delta < \alpha} \wedge \\ &f_6 = \{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha} \wedge [\text{fórmula } \Delta_0] \wedge \bigwedge \delta \in \alpha [\text{fórmula } \Delta_0]), \end{aligned}$$

pues los parámetros que aparecen en ψ pueden sustituirse por $f_4(\delta)$, $f_5(\delta)$, $f_6(\delta)(n)$, $f_4(\delta + 1)$, f_1 , $f_2(n)$, $f_3(n)$, respectivamente.

Ahora usamos que la fórmula $\bigvee f\phi(f, Y, \alpha, A)$ dada por el teorema 3.7 fuerza a que f sea

$$(\omega, \{\omega^n\}_{n \in \omega}, \{(\omega^{<\omega})^n\}_{n \in \omega}, \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha}, \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \alpha}, \{\{L_\delta[A]^n\}_{n \in \omega}\}_{\delta < \alpha}),$$

con lo que

$$S = \trianglelefteq_{A, \alpha} \leftrightarrow \bigvee h f Y f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 (\phi(f, Y, \alpha, A) \wedge f = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6) \dots),$$

donde los puntos suspensivos son una fórmula Δ_0 . Ahora bien, es claro que las f_i son elementos de elementos, ... de f , por lo que pueden acotarse con f introduciendo un número finito de variables intermedias, al igual que $Y = L_\alpha[A]$, que se acota por f_4 , luego

$$S = \trianglelefteq_{A, \alpha} \leftrightarrow \bigvee h f [fórmula \Delta_0]$$

y un mínimo retoque nos da que

$$S = \trianglelefteq_{A, \alpha} \leftrightarrow \bigvee f \psi(f, S, \alpha, A),$$

donde ψ es Δ_0 y, si se cumple esta fórmula, necesariamente f es la séptupla que resulta de añadir a la f previa una séptima componente igual a $\{\trianglelefteq_{A, \delta}\}_{\delta \leq \alpha}$.

Teniendo en cuenta el teorema 3.7 (y su demostración) para probar el apartado b) sólo necesitamos comprobar que $\{\trianglelefteq_{A, \delta}\}_{\delta \leq \alpha} \in L_\lambda[A]$. Ahora bien, sabemos que existe un $\epsilon < \lambda$ tal que $L_\epsilon[A]$ contiene a

$$\omega, \quad \omega^{<\omega}, \quad (\omega^{<\omega})^{<\omega}, \quad \{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha+1}, \quad \{L_\delta[A]^{<\omega}\}_{\delta \leq \alpha}, \quad \{H_{L_\delta[A], A}\}_{\delta < \alpha},$$

luego $\trianglelefteq_{A, \delta} \subset L_{\epsilon+2}[A]$ y $\trianglelefteq_{A, \delta} \in L_{\epsilon+3}[A]$ porque la fórmula $y \trianglelefteq_{A, \delta} z$ equivale a una fórmula Δ_0 con los parámetros anteriores. A su vez, $\{\trianglelefteq_{A, \delta}\}_{\delta \leq \alpha} \subset L_{\epsilon+5}[A]$ y entonces $\{\trianglelefteq_{A, \delta}\}_{\delta \leq \alpha} \in L_{\epsilon+6}[A]$, porque podemos definir la sucesión usando $\{L_\delta[A]\}_{\delta \leq \alpha+1}$ como parámetro. ■

Así pues, el término $\trianglelefteq_{A, \alpha}$ es Σ_1 , luego Δ_1 , y la relación $x \trianglelefteq_A y$ es Σ_1 , pero si se cumple $V = L[A]$ también es Δ_1 , pues en tal caso

$$x \trianglelefteq_A y \leftrightarrow x = y \vee \neg y \trianglelefteq_A x.$$

En cualquier caso, la relación $x \trianglelefteq_A y$ es absoluta para $L[A]$, pues al ser Σ_1 es absoluta hacia arriba, es decir, si $x, y \in L[A]$ cumplen $(x \trianglelefteq_A y)^{L[A]}$, también cumplen $x \trianglelefteq_A y$ y, reciprocamente, si $x \trianglelefteq_A y$, tiene que cumplirse $(x \trianglelefteq_A y)^{L[A]}$, pues en caso contrario sería $(y \triangleleft_A x)^{L[A]}$, lo que implicaría $y \triangleleft_A x$.

La enumeración de los conjuntos constructibles Conviene señalar algunas consecuencias elementales de 3.14:

- Si $x \in L[A]$, $y \in L_\alpha[A]$, $x \trianglelefteq_A y$, entonces $x \in L_\alpha[A]$.
- Si $x \in y \in L[A]$, entonces $x \triangleleft_A y$.

En efecto, la segunda propiedad se debe a que podemos considerar el mínimo ordinal δ tal que $y \in L_\delta[A]$, que no puede ser un ordinal límite, luego $\delta = \alpha + 1$, luego $y \in L_\alpha[A]$, luego $x \in L_\alpha[A]$, $y \notin L_\alpha[A]$, luego $x \triangleleft_A y$.

Para cada $x \in L[A]$, definimos

$$\text{pr}_A(x) = \{y \in L[A] \mid y \triangleleft_A x\},$$

que es un conjunto, pues si $x \in L_\alpha[A]$ entonces $\text{pr}_A(x) \subset L_\alpha[A]$. De hecho,

$$\text{pr}_A(x) = \{y \in L_\alpha[A] \mid L_\alpha[A] \vDash [y] \triangleleft_A [x]\} \in L_{\alpha+1}[A].$$

En particular, si $x \in L_\lambda[A]$, también $\text{pr}_A(x) \in L_\lambda[A]$.

Notemos además que

$$\begin{aligned} y = \text{pr}_A(x) \leftrightarrow \forall \alpha Y R(Y = L_\alpha[A] \wedge R = \trianglelefteq_{A,\alpha} \wedge x \in Y \wedge y \subset Y \wedge \\ \wedge z \in Y(z \in y \leftrightarrow z R x \wedge z \neq x)), \end{aligned}$$

lo que prueba que $\text{pr}_A(x)$ es Σ_1 y, por lo tanto, Δ_1 . Más aún, los teoremas 3.7 y 3.17 implican claramente que si $x \in L_\lambda[A]$ para cierto $\lambda > \omega$, se cumple

$$y = \text{pr}_A(x) \leftrightarrow \forall g \chi(g, y, x, A) \leftrightarrow \forall g \in L_\lambda[A] \chi(g, y, x, A),$$

donde χ es una fórmula Δ_0 en la que A sólo aparece en subfórmulas de tipo $x \in A$.

Podemos considerar la aplicación $F_A : \Omega \longrightarrow L[A]$ dada por

$$F_A = \{(\alpha, x) \mid \alpha = \text{ord}(\text{pr}_A(x), \trianglelefteq)\},$$

que claramente es la semejanza entre ambas clases. De este modo, cada conjunto de $L[A]$ está únicamente determinado por un ordinal. Además la fórmula

$$\begin{aligned} F_A(\alpha) = x \leftrightarrow \forall \delta Z R z f(Z = L_\delta[A] \wedge R = \trianglelefteq_{A,\delta} \wedge x \in Z \wedge z = \text{pr}_A(x) \wedge \\ f : (\alpha + 1, \leq) \longrightarrow (z, R) \text{ semejanza} \wedge f(\alpha) = x) \end{aligned}$$

es Σ_1 , luego el término $F_A(\alpha)$ es Δ_1 .

Como aplicación probamos lo siguiente:

Teorema 3.18 *Para todo conjunto A , si todo conjunto de ordinales pertenece a $L[A]$, entonces $V = L[A]$.*

DEMOSTRACIÓN: Razonamos por \in -inducción, es decir, tomamos un conjunto tal $x \subset L[A]$ y basta probar que $x \in L[A]$. Por reemplazo (Σ_1 -reemplazo en el caso de KPI) existe el conjunto $a = \{F_A^{-1}(u) \mid u \in x\} \subset \Omega$. Por hipótesis $a \in L[A]$, y entonces $x = F_A[a] = (F_A[a])^{L[A]} \in L[A]$. ■

Un resultado similar, que se apoya también en que $L[A]$ cumple el axioma de elección, es el siguiente:

Teorema 3.19 (ZF) *Para todo conjunto A existe un conjunto $A' \subset \Omega$ tal que $L[A] = L[A']$.*

DEMOSTRACIÓN: Cambiando A por $A \cap L[A]$ si es necesario, podemos suponer que $A \in L[A]$. Sea $B = \text{ct}A \cup \{A\} \in L[A]$. Sea $\kappa = |B|^{L[A]}$. Si B es finito entonces $A \in V_\omega \subset L$, luego $A = L = L[\emptyset]$ (es decir, sirve $A' = \emptyset$).

Supongamos, pues, que B es infinito. Sea $f \in L[A]$ tal que $f : \kappa \longrightarrow B$ biyectiva.

Sea $E \subset \kappa \times \kappa$ la relación dada por $\alpha E \beta \leftrightarrow f(\alpha) \in f(\beta)$. Obviamente $E \in L[A]$, está bien fundada, es extensional y, por unicidad, B es el colapso transitivo de (κ, E) (y f es la función colapsante).

Sea $g \in L$ tal que $g : \kappa \times \kappa \longrightarrow \kappa$ biyectiva y sea $A' = g[E] \in L[A]$. Tenemos que $L[A'] \subset L[A]$. Por otra parte, como A' es un conjunto de ordinales, se cumple que $A' \in L[A']$ y $g \in L \subset L[A']$, luego $E \in L[A']$, luego B , que es el colapso de (κ, E) , también está en $L[A']$, y por transitividad $A \in L[A']$ y también $L[A] \subset L[A']$. ■

Así pues, desde un punto de vista teórico es suficiente estudiar las clases $L[A]$ con $A \subset \Omega$.

Nota Si hasta ahora hemos trabajado en KPI o ZF–AP en lugar de en ZF ha sido para demostrar que la clase $L[A]$ y el buen orden \trianglelefteq_A son definibles en estas teorías. Esto es relevante, por ejemplo, a la hora de que el teorema 3.11 sea aplicable a modelos que no cumplen todos los axiomas de ZF (especialmente el axioma de partes). A partir de este punto (salvo que indiquemos explícitamente lo contrario) trabajaremos ya siempre en ZF (o en ZFC cuando así lo indiquemos) y sólo consideraremos KPI o ZF–AP de forma indirecta, cuando tratemos con modelos. ■

3.5 Los modelos $L_\lambda[A]$

Estudiamos ahora con más detalle los conjuntos $L_\lambda[A]$ desde el punto de vista de la teoría de modelos. Empezamos calculando su cardinal:

Teorema 3.20 $\bigwedge A \alpha (\alpha \geq \omega \rightarrow |L_\alpha[A]| = |\alpha|)$.

DEMOSTRACIÓN: En primer lugar lo demostramos suponiendo AE. Equivalentemente, podemos probar que $\bigwedge \alpha |L_{\omega+\alpha}[A]| = |\omega + \alpha|$. Razonamos por inducción sobre α . Si $\alpha = 0$ tenemos que $L_\omega[A]$ es numerable porque es unión numerable de conjuntos finitos. Si vale para α , también vale para $\alpha + 1$ por el teorema 3.3 f). Por último, si vale para todo $\delta < \lambda$, entonces

$$|\omega + \lambda| \leq |L_{\omega+\lambda}[A]| \leq \sum_{\delta < \lambda} |L_{\omega+\delta}[A]| = \sum_{\delta < \lambda} |\omega + \delta| \leq |\lambda||\omega + \lambda| = |\omega + \lambda|.$$

Esto termina la prueba bajo AE. Cambiando A por $A \cap L[A]$ podemos suponer que $A \in L[A]$, pero $L[A]$ es un modelo transitivo de ZFC, luego, por lo que

acabamos de probar, el teorema es cierto relativizado a $L[A]$, y esto significa que, para todo ordinal infinito α , se cumple

$$(\forall f \ f : \alpha \longrightarrow L_\alpha[A] \text{ biyectiva})^{L[A]},$$

es decir, $\forall f \in L[A] \ f : \alpha \longrightarrow L_\alpha[A]$ biyectiva, y en particular $|L_\alpha[A]| = |\alpha|$. \blacksquare

El teorema 2.15 vale también para la jerarquía constructible:

Teorema 3.21 *Si κ es un cardinal regular $^{L[A]}$ no numerable $^{L[A]}$, el conjunto*

$$\{\alpha < \kappa \mid L_\alpha[A] \prec L_\kappa[A]\}$$

es cerrado no acotado en κ .

DEMOSTRACIÓN: Supongamos primero que $V = L[A]$. Entonces, la misma demostración de 2.15 sin más que cambiar V_α por $L_\alpha[A]$ prueba el enunciado para todo cardinal regular no numerable κ .

Para el caso general tomamos $\bar{A} = A \cap L[A]$, de modo que $L[A] = L[\bar{A}]$ y $L[\bar{A}]$ es un modelo de ZFC en el cual se cumple (la relativización de)

$$\bigwedge A\kappa(V = L[A] \wedge \kappa \text{ es un cardinal regular no numerable} \rightarrow \dots),$$

que, particularizada a \bar{A} y teniendo en cuenta que en $L[\bar{A}]$ se cumple $V = L[\bar{A}]$, es

$$\bigwedge \kappa(\kappa \text{ es un cardinal regular}^{L[\bar{A}]} \text{ no numerable}^{L[\bar{A}]} \rightarrow \dots),$$

donde el resto es claramente absoluto. \blacksquare

Notemos que ser un cardinal regular no numerable es Π_1 , por lo que todo cardinal regular no numerable es un cardinal regular no numerable $^{L[A]}$, y así el teorema anterior vale, en particular, para todos los cardinales regulares no numerables. Por otra parte, una ligera modificación de la prueba de 3.8 nos da:

Teorema 3.22 *Si κ es un cardinal regular $^{L[A]}$ no numerable $^{L[A]}$ entonces $L_\kappa[A]$ es un modelo transitivo de ZFC–AP y de KPI.*

DEMOSTRACIÓN: Como en el caso del teorema anterior basta probar el teorema suponiendo $V = L[A]$. Los axiomas de extensionalidad, regularidad, par, unión e infinitud se comprueban exactamente igual que en 3.8, sin más que cambiar $L[A]$ por $L_\kappa[A]$. El axioma de reemplazo se demuestra sustituyendo el teorema de reflexión por el teorema anterior:

Partimos de $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$, fijamos $x_1, \dots, x_n \in L_\kappa[A]$, suponemos que

$$\bigwedge xyz(L_\kappa[A] \models \phi[x, y] \wedge L_\kappa[A] \models \phi[x, z] \rightarrow y = z)$$

y fijamos un $a \in L[A]$. Tenemos que probar que

$$b = \{y \in L_\kappa[A] \mid \forall x \in a \ L_\kappa[A] \models \phi[x, y]\} \in L_\kappa[A].$$

Consideramos la función $f : b \rightarrow \kappa$ tal que $f(y)$ es el mínimo δ tal que $y \in L_\delta[A]$. Tomamos $\alpha < \kappa$ tal que $a \in L_\alpha[A]$. Entonces

$$|f[b]| \leq |b| \leq |a| \leq |L_\alpha[A]| < \kappa,$$

y como κ es regular concluimos que $f[b]$ está acotado en κ . Por el teorema anterior existe $\lambda < \kappa$ tal que $f[b] \subset \lambda$, $x_1, \dots, x_n, a \in L_\lambda[A]$ y $L_\lambda[A] \prec L_\kappa[A]$. En particular resulta que

$$\begin{aligned} b = \{y \in L_\lambda[A] \mid L_\kappa[A] \models \forall x \in [a] \phi[x, y]\} = \\ \{y \in L_\lambda[A] \mid L_\lambda[A] \models \forall x \in [a] \phi[x, y]\} \in \mathcal{PDL}_\lambda[A] = L_{\lambda+1}[A] \subset L_\kappa[A]. \end{aligned}$$

El axioma de elección se justifica trivialmente a partir del buen orden constructible. El esquema de especificación es un teorema de ZF–AP, por lo que no hace falta demostrarlo. También se cumple el esquema de recolección para fórmulas $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ cualesquiera, no necesariamente Δ_0 , pues se trata de probar

$$\begin{aligned} \lambda u \in L_\kappa[A] \lambda v \in L_\kappa[A] L_\kappa[A] \models \phi[u, v] \rightarrow \\ \lambda a \in L_\kappa[A] \lambda b \in L_\kappa[A] \lambda u \in a \lambda v \in b L_\kappa[A] \models \phi[u, v]. \end{aligned}$$

Si suponemos el antecedente del implicador y fijamos $a \in L[A]$, tenemos también que

$$\lambda u \in a \lambda v \in L_\kappa[A] (v \in L_\alpha[A] \wedge L_\kappa[A] \models \phi[u, v]).$$

Definimos $f : a \rightarrow \kappa$ que a cada $u \in a$ le asigna el mínimo α que cumple la sentencia anterior. Como $a \in L_\alpha[A]$, con $\alpha < \kappa$, tenemos que $|a| < \kappa$, y la regularidad de κ nos da que f está acotada, es decir, que existe un $\alpha < \kappa$ tal que $\lambda u \in a \lambda v \in L_\alpha[A] L_\kappa[A] \models \phi[u, v]$, luego basta tomar $b = L_\alpha[A]$. ■

Los dos últimos teoremas muestran que hay muchos modelos L_λ que satisfacen ZFC–AP o KPI (incluso numerables). Por otra parte, puesto que $L[A]$ es un modelo de ZFC, el teorema de reflexión [LM 12.28] nos da que existen ordinales límite λ tales que $L_\lambda[A]$ es un modelo de ZFC en el sentido débil de que cumpla cualquier conjunto finito de axiomas de ZFC ($+ V = L$) prefijado.

Colapsando un submodelo elemental podemos obtener modelos numerables:

Teorema 3.23 *Dado cualquier conjunto finito Γ de axiomas de ZFC, existe un ordinal numerable λ tal que $L_\lambda \models \Gamma$.*

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema de reflexión existe un ordinal límite λ' tal que $L_{\lambda'} \models \Gamma$. Por el teorema de Löwenheim-Skolem [TC 11.25] existe $N \prec L_{\lambda'}$ numerable.⁸ Como N es un modelo natural, está bien fundado, luego podemos considerar su colapso transitivo M , que es un modelo transitivo numerable de

⁸En principio [TC 11.25] requiere el axioma de elección, pero sólo para tomar funciones de Skolem en el modelo L_λ , pero en este contexto podemos definirlas usando el buen orden constructible, con lo que no se requiere AE.

$ZFC + V = L$, porque $L_{\lambda'}$ cumple $V = L$. Añadiéndolos si es preciso, podemos suponer que Γ contiene los axiomas necesarios de ZFC para que se cumpla el teorema 3.11, y así podemos concluir que $M = L_\lambda$, para cierto ordinal λ (necesariamente un ordinal límite), claramente numerable. ■

Así pues, incluso sin el axioma de elección, puede demostrarse la existencia de modelos transitivos numerables de $ZFC + V = L$ (en el sentido de modelos de cualquier conjunto finito de axiomas prefijado).

El teorema siguiente nos permitirá generalizar ligeramente 3.22:

Teorema 3.24 *Si κ es un cardinal infinito, $A \in H(\kappa)$ y $V = L[A]$, entonces $H(\kappa) = L_\kappa[A]$.*

DEMOSTRACIÓN: Si $x \in L_\kappa[A]$, entonces existe un $\alpha < \kappa$ tal que $x \in L_\alpha[A]$, luego $\text{ct } x \subset L_\alpha[A]$, luego $|\text{ct } x| \leq |L_\alpha[A]| < \kappa$, por el teorema 3.20 si α es infinito y trivialmente si es finito. Por lo tanto $x \in H(\kappa)$.

Recíprocamente, si $x \in H(\kappa)$, entonces $|\text{ct } x| < \kappa$. Sea λ un ordinal límite tal que $x, A \in L_\lambda[A]$ y $L_\lambda[A]$ sea un modelo de (suficientes axiomas de) ZFC. Consideremos [TC 11.23] el núcleo de Skolem

$$N = N(\text{ct } A \cup \{A\} \cup \text{ct } x \cup \{x\}) \prec L_\lambda[A].$$

De este modo, $|N| < \kappa$. Sea $\pi : N \longrightarrow M$ la función colapsante de N y sea $i : M \longrightarrow L_\lambda$ su inversa, que es una inmersión elemental.

Una simple \in -inducción sobre $\text{ct } x \cup \{x\}$ prueba que π es la identidad sobre este conjunto. En particular $x = \pi(x) \in M$. Igualmente, $A \in M$.

Por último, como $L_\lambda[A]$ es un modelo transitivo de $ZFC + V = L[A]$, lo mismo vale para N (por ser un submodelo elemental) y para M (por ser isomorfo a N por un isomorfismo que deja invariante a A). Por el teorema 3.11 sabemos que $M = L_{\lambda'}[A]$, para λ' tal que $|\lambda'| = |L_{\lambda'}[A]| = |N| < \kappa$, luego $\lambda' < \kappa$, y así pues $x \in L_{\lambda'}[A] \subset L_\kappa[A]$. ■

Como consecuencia:

Teorema 3.25 *Si κ es un cardinal no numerable y $A \in H(\kappa)$, entonces $L_\kappa[A]$ es un modelo transitivo de KPI.*

DEMOSTRACIÓN: Si cambiamos A por $A \cap L[A]$ se siguen cumpliendo las hipótesis del teorema y además $A \in L[A]$, luego no perdemos generalidad si suponemos esto. Entonces $L[A]$ cumple $V = L[A]$, luego por el teorema anterior $L_\kappa[A] = H(\kappa)^{L[A]}$, y por 2.33 relativizado a $L[A]$, tenemos que $H(\kappa)^{L[A]} \models \text{KPI}$, luego $L_\kappa[A] \models \text{KPI}$. ■

En particular, si $a \subset V_\omega$ y κ es un cardinal infinito no numerable (no necesariamente regular), se cumple que $L_\kappa[a] \models \text{KPI}$.

Funciones de Skolem definibles Aunque, en general, asignar funciones de Skolem a un modelo requiere el axioma de elección, ya hemos indicado que esto no es así en el caso de los modelos $L_\lambda[A]$, pues podemos definirlas usando el buen orden constructible. Esto tiene algunas consecuencias que conviene destacar.

Definición 3.26 Diremos que un modelo M de un lenguaje formal \mathcal{L} admite *funciones de Skolem definibles* si existe una aplicación de $\text{Form}(\mathcal{L})$ en sí mismo que a cada fórmula ϕ con al menos la variable libre x_0 le asigna otra fórmula $\bar{\phi}$ con las mismas variables libres de modo que

$$\begin{aligned} M \models \bigwedge_{x_1 \dots x_n} (\bigvee_{x_0}^1 \bar{\phi}(x_0, x_1, \dots, x_n) \wedge \\ (\bigvee_{x_0} \phi(x_0, \dots, x_n) \rightarrow \bigvee_{x_0} (\phi(x_0, \dots, x_n) \wedge \bar{\phi}(x_0, \dots, x_n))). \end{aligned}$$

La primera parte afirma que para cada $a_1, \dots, a_n \in M$ existe un único a y M que cumple $M \models \bar{\phi}[a, a_1, \dots, a_n]$, por lo que podemos definir $h_\phi : M^n \rightarrow M$ mediante $h_\phi(a_1, \dots, a_n) = a$.

La segunda parte afirma que si $\bigvee b \in M M \models \phi[b, a_1, \dots, a_n]$, entonces el único $a \in M$ que cumple $\bar{\phi}(a, a_1, \dots, a_n)$, es decir, $h_\phi(a_1, \dots, a_n)$, cumple

$$M \models \phi[h_\phi(a_1, \dots, a_n), a_1, \dots, a_n].$$

Por lo tanto, las funciones h_ϕ son funciones de Skolem para M en el sentido de [TC 11.23].

Vamos a probar que los modelos $(L_\lambda[A], A)$, con $\lambda > \omega$, tienen funciones de Skolem definibles. En efecto, vamos a considerar que

$$x \sqsubseteq_A y \equiv \bigvee \alpha f f' Y S(\phi(f, Y, \alpha, A) \wedge \psi(f', S, \alpha, A) \wedge x \in Y \wedge y \in Y \wedge x R y),$$

donde ϕ y ψ son las fórmulas Δ_0 dadas por los teoremas⁹ 3.7 y 3.17. Así

$$x \sqsubseteq_A y \leftrightarrow \bigvee \alpha (x \in L_\alpha[A] \wedge y \in L_\alpha[A] \wedge x \sqsubseteq_{A,\alpha} y),$$

que es equivalente a que estén relacionados por el buen orden constructible. De este modo, tenemos que

$$\bigwedge xy \in L_\lambda[A] (x \sqsubseteq_A y \leftrightarrow (x \sqsubseteq_A y)^{L_\lambda[A]}).$$

Llamamos $x \trianglelefteq y$ a la fórmula de $\mathcal{L}_{\text{tc}}^+$ correspondiente a $x \sqsubseteq_A y$, donde las subfórmulas $x \in A$ se sustituyen por Rx , de modo que, mientras la fórmula metamatemática $x \sqsubseteq_A y$ tiene tres variables libres, la fórmula $(x \trianglelefteq y) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$ tiene únicamente dos, y se cumple

$$\bigwedge xy \in L_\lambda[A] (x \sqsubseteq_A y \leftrightarrow L_\lambda[A] \models [x] \trianglelefteq [y]).$$

Observemos que la fórmula $x \trianglelefteq y$ es una única fórmula de $\mathcal{L}_{\text{tc}}^+$, independiente de A o de λ , y determina un buen orden en cada conjunto $L_\lambda[A]$.

Para cada fórmula $\phi(x_0, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}}^+)$, definimos

$$\begin{aligned} \bar{\phi}(x_0, \dots, x_n) \equiv & (\bigvee_{x_0} \phi(x_0, \dots, x_n) \wedge \phi(x_0, \dots, x_n) \wedge \\ & \bigwedge_{x_{n+1}} (x_{n+1} \triangleleft x_0 \rightarrow \neg \phi(x_{n+1}, x_1, \dots, x_n))) \vee \\ & (\neg \bigvee_{x_0} \phi(x_0, \dots, x_n) \wedge \bigwedge_{x_{n+1}} x_{n+1} \notin x_0). \end{aligned}$$

⁹El lector que no quiera apoyarse en estos teoremas puede tomar como $x \sqsubseteq_A y$ cualquier definición Σ_1 del buen orden constructible en KPI o ZF–AP y considerar únicamente ordinales límite λ tales que $L_\lambda[A]$ sea un modelo de la teoría correspondiente.

En definitiva, $\bar{\phi}$ dice que x_0 es el mínimo conjunto que cumple ϕ si existe tal conjunto o es \emptyset en caso contrario. Es claro que las fórmulas $\bar{\phi}$ definen funciones de Skolem h_ϕ para $(L_\lambda[A], A)$.

En general, un elemento a de un modelo M de un lenguaje formal \mathcal{L} se dice que es *definible* a partir de $a_1, \dots, a_n \in M$ si existe una fórmula $\phi(x_0, \dots, x_n)$ de \mathcal{L} tal que a es el único objeto de M que cumple $M \models \phi[a, a_1, \dots, a_n]$. En particular, a es *definible* si es el único objeto de M que cumple $M \models \phi[a]$, para una cierta fórmula $\phi(x_0)$.

En estos términos, si un modelo M de un lenguaje \mathcal{L} admite funciones de Skolem definibles, tenemos que $h_\phi(a_1, \dots, a_n)$ es definible a partir de a_1, \dots, a_n .

Teorema 3.27 *Si M es un modelo de un lenguaje formal \mathcal{L} y admite funciones de Skolem definibles, entonces, para todo $X \subset M$, el núcleo de Skolem de X en M respecto de tales funciones es el conjunto $N(X)$ de los elementos de M definibles a partir de elementos de X . Además $N(X)$ es el menor submodelo elemental de M que contiene a X .*

DEMOSTRACIÓN: Sea $N(X)$ el núcleo de Skolem en el sentido de [TC 11.23] y vamos a probar que coincide con el conjunto descrito en el enunciado. Sabemos que $N(X) \prec M$. Si $a \in M$ es definible a partir de $a_1, \dots, a_n \in X$, esto significa que existe una fórmula ϕ tal que a es el único elemento de M que cumple $M \models \phi[a, a_1, \dots, a_n]$. Entonces $M \models \bigvee x_0 \phi(x_0)[a_1, \dots, a_n]$ y como $N(X)$ es un submodelo elemental y $a_1, \dots, a_n \in X \subset N(X)$, también

$$N(X) \models \bigvee x_0 \phi(x_0)[a_1, \dots, a_n],$$

luego existe un $b \in N(X)$ tal que $N(X) \models \phi[b, a_1, \dots, a_n]$ y de nuevo por ser un submodelo elemental, $M \models \phi[b, a_1, \dots, a_n]$. Por la unicidad de la a tiene que ser $a = b \in N(X)$. Así pues, $N(X)$ contiene todos los elementos definibles en M .

Ahora usamos la definición de $N(X) = \bigcup_{k \in \omega} N_k(X)$ para probar inductivamente que los elementos de $N_k(X)$ son definibles respecto de X . En primer lugar $N_0(X) = X$, y es claro que todo elemento de $a \in X$ es definible respecto de a , por la fórmula $x_0 = x_1$.

Supongamos que $N_k(X)$ consta únicamente de elementos definibles, y sea $a \in N_{k+1}(X)$. Esto significa que, o bien $a \in N_k(X)$, en cuyo caso es definible por hipótesis de inducción, o bien $a = h_\phi(a_1, \dots, a_n)$, para cierta función de Skolem h_ϕ y ciertos $b_1, \dots, b_n \in N_k(X)$. Como h_ϕ es definible, existe una fórmula $\bar{\phi}$ tal que a es el único elemento de M que cumple

$$M \models \bar{\phi}[a, b_1, \dots, b_n],$$

y como cada b_i es definible a partir de elementos de X , existen $a_1, \dots, a_m \in X$ y fórmulas ϕ_i tales que b_i es el único elemento de M que cumple

$$M \models \phi_i[b_i, a_1, \dots, a_m].$$

Por consiguiente, a está definido en M a partir de a_1, \dots, a_m por la fórmula

$$\forall y_1 \dots y_n (\bar{\phi}(x_0, y_1, \dots, y_n) \wedge \phi_1(y_1, x_1, \dots, x_m) \wedge \dots \wedge \phi_n(y_n, x_1, \dots, x_m)).$$

Así pues, todos los elementos de $N_{k+1}(X)$ son definibles a partir de X y, terminada la inducción, esto vale para todo elemento de $N(X)$.

Si $X \subset N \prec M$ y $a \in N(X)$, sea $\phi(x_0, \dots, x_n)$ una fórmula que defina a a en términos de $a_1, \dots, a_n \in X \subset N$. Entonces $M \models \phi[a, a_1, \dots, a_n]$, luego $M \models \forall x_0 \phi[a_1, \dots, a_n]$, luego $N \models \forall x_0 \phi[a_1, \dots, a_n]$, luego existe un $b \in N$ tal que $N \models \phi[b, a_1, \dots, a_n]$, luego $M \models \phi[b, a_1, \dots, a_n]$, luego por la unicidad de a tiene que ser $a = b \in N$. Esto prueba que $N(X) \subset N$. ■

Notemos que es posible seleccionar distintos conjuntos de funciones de Skolem definibles en un mismo modelo, pero, según acabamos de probar, todas ellas definen los mismos núcleos de Skolem. En particular, el conjunto $N(\emptyset)$ de todos los elementos definibles de M es el menor submodelo elemental de M .

También es inmediato que los elementos de $N(X)$ son todos definibles en $N(X)$ a partir de X , así que en el modelo $N(\emptyset)$ todos los objetos son definibles.

El modelo transitivo mínimo de ZF Vamos a estudiar ahora la sentencia **MBF** *Existe un modelo bien fundado de ZF*.

Aquí hay que entender que nos referimos a un modelo en el sentido fuerte de que exista un conjunto M que cumpla todos los axiomas de ZF. Por otro lado, sabemos que ConsisZF es equivalente a la existencia de un modelo de ZF, luego trivialmente $\text{MBF} \rightarrow \text{ConsisZF}$. El segundo teorema de incompletitud de Gödel nos da entonces que MBF no es demostrable en ZF, pero vamos a dar una prueba directa de este hecho.

Antes observemos que, por el teorema del colapso de Mostowski, MBF es equivalente a la existencia de un modelo transitivo de ZF. Si M es tal modelo transitivo y $\lambda = \Omega^M$, tenemos que L_λ es un modelo transitivo de $\text{ZFC} + V = L$, y podemos considerar el mínimo ordinal μ tal que $L_\mu \models \text{ZFC}$.

El modelo L_μ recibe el nombre de *modelo mínimo* de ZFC, y es claro que está contenido en cualquier modelo transitivo de ZF. En efecto, si M es cualquier modelo transitivo de ZF, entonces L_{Ω^M} es un modelo transitivo de ZFC, luego $\mu \leq \Omega^M$, luego $L_\mu \subset L_{\Omega^M} \subset M$.

Se cumple que μ (luego también L_μ) es numerable, ya que podemos razonar a partir de él como en el teorema 3.23, es decir, tomamos un submodelo elemental numerable, lo colapsamos, y el resultado tiene que ser un L_λ , con λ numerable, tal que $L_\lambda \models \text{ZFC}$, luego $\mu \leq \lambda$.

Más aún, L_μ tiene la propiedad de que todos sus elementos son definibles, pues podríamos tomar el colapso transitivo de su núcleo de Skolem $N(\emptyset)$, que sería un modelo transitivo de $\text{ZFC} + V = L$ en el que todo elemento es definible, luego sería de la forma L_λ y la inversa de la función colapsante sería una

inmersión elemental $i : L_\lambda \longrightarrow L_\mu$. Como la imagen de un ordinal en L_λ tiene que ser un ordinal en L_μ , concluimos que $\lambda \leq \mu$, luego $\lambda = \mu$ por la minimalidad de μ . Además,

$$L_\mu \models \text{ZFC} + \neg\text{MBF},$$

pues si $L_\mu \models \text{MBF}$, entonces

$$L_\mu \models \bigvee \lambda L_\lambda \models \text{ZFC},$$

pero esto es absoluto, por lo que debería existir un $\lambda < \mu$ tal que $L_\lambda \models \text{ZFC}$, en contra de la minimalidad de μ .

Esto nos da una prueba constructiva de que, tal y como indicábamos, si ZFC es consistente, MBF no es demostrable en ZFC. En efecto, si en ZFC pudiera probarse MBF, entonces en ZFC podríamos probar que existe un ordinal μ tal que $L_\mu \models \text{MBF}$ y $L_\mu \models \neg\text{MBF}$, con lo que ZFC sería contradictorio.

En particular tenemos una prueba directa (que no requiere el segundo teorema de incompletitud de Gödel) de que en ZFC no puede probarse la existencia de cardinales inaccesibles, ya que esto implica la existencia de un modelo transitivo de ZFC.

Vamos a probar ahora que Consis ZFC no implica MBF, es decir, que la existencia de un modelo de ZFC no implica que exista un modelo bien fundado de ZF, salvo en el caso trivial en que ZFC + Consis ZFC sea contradictorio.

En efecto, si Consis ZFC \rightarrow MBF, suponiendo Consis ZFC, tenemos el modelo minimal L_μ , pero $L_\mu \models \text{Cisis ZFC}$, pues Consis ZFC es equivalente a una afirmación sobre números naturales y, por consiguiente, es absoluta para modelos transitivos (los números naturales de L_μ son los mismos que los de V). Pero entonces tendríamos $L_\mu \models \text{MBF}$, cuando por otra parte hemos visto que se puede probar $L_\mu \models \neg\text{MBF}$, y así tenemos una contradicción en ZFC + Consis ZFC.

Así pues, a partir de un modelo de ZFC, no es posible construir en modo alguno un modelo bien fundado de ZFC. El teorema 2.37 nos da que podemos obtener un modelo bien fundado de KP+AP, pero ni siquiera podemos asegurar que cumple el axioma de infinitud.

3.6 Argumentos de condensación

Informalmente, reciben el nombre de argumentos de condensación los argumentos consistentes en tomar un submodelo elemental de un modelo transitivo dado de $\text{ZFC} + V = L[A]$ (o KPI, o ZF–AP), para cierto A , y usar que, por el teorema 3.11, su colapso transitivo tiene que ser de la forma $L_\lambda[A']$, para cierto ordinal límite λ y cierto A' (que en ocasiones será el propio A).

Ya hemos visto un ejemplo rudimentario de esta técnica en la prueba del teorema 3.23, y otro más típico en la prueba de 3.24. Sin embargo, el más destacado es el que nos lleva a la demostración de que el axioma de constructibilidad implica la hipótesis del continuo generalizada.

La idea básica es la siguiente: tenemos que $\omega \subset L_\omega = V_\omega$, pero, mientras en $V_{\omega+1}$ se encuentran ya “todos” los subconjuntos de ω (sea lo que sea ese “todos”, es decir, “todos los que están en V ”), el conjunto $L_{\omega+1}$ es numerable, luego no puede contener a todos los subconjuntos de ω en ningún sentido de la palabra “todos” compatible con los axiomas de ZFC. Esto significa que, si suponemos el axioma de constructibilidad, $V = L$, en los niveles siguientes de la jerarquía constructible, $L_{\omega+1}, L_{\omega+2}, L_{\omega+3}, \dots$ tienen que ir apareciendo nuevos subconjuntos de ω . Sin embargo, mediante un argumento de condensación vamos a probar que $\mathcal{P}\omega \subset L_{\omega_1}$, es decir, que todos los subconjuntos de ω aparecen en los niveles numerables de la jerarquía conjuntista, luego $2^{\aleph_0} = |\mathcal{P}\omega| \leq |L_{\omega_1}| = \aleph_1$.

En realidad el teorema siguiente se deduce fácilmente de 3.24, pero merece la pena dar una prueba directa:

Teorema 3.28 *Sea A un conjunto y supongamos que $V = L[A]$. Si se cumple $A \in L_\alpha[A]$, entonces $\mathcal{P}L_\alpha[A] \subset L_{\alpha^+}[A]$.*

DEMOSTRACIÓN: Podemos suponer que α es infinito, pues en caso contrario el teorema es obvio. Sea $a \in \mathcal{P}L_\alpha[A]$. Sea $N = N(L_\alpha[A] \cup \{a\}) \prec L_{\alpha^+}[A]$. Así $|N| = |L_\alpha[A]| = |\alpha| < \alpha^+$ y, como $L_\alpha[A] \cup \{a\}$ es transitivo, es fácil ver que la función colapsante fija a todos sus elementos. Por lo tanto, el colapso transitivo M de N cumple que $L_\alpha[A] \subset M$ y $a \in M$. En particular $A \in M$. Como¹⁰ $L_{\alpha^+}[A] \models \text{KPI} + V = L[A]$, lo mismo vale para N , luego también para M , luego por 3.11 sabemos que $M = L_\lambda[A]$, para $\lambda = \Omega^M$. Además $|\lambda| = |M| = |N| < \alpha^+$, luego $\lambda < \alpha^+$ y $a \in L_\lambda[A] \subset L_{\alpha^+}[A]$. ■

Notemos que en la prueba del teorema anterior no podemos garantizar que N cumple el axioma de partes, por lo que es fundamental que el teorema 3.11 es válido para modelos de KPI o ZF–AP.

De aquí se sigue inmediatamente:

Teorema 3.29 *Sea A un conjunto y supongamos $V = L[A]$. Sea α el mínimo ordinal tal que $A \in L_{\alpha^+}[A]$. Entonces para todo cardinal infinito $\kappa \geq \alpha$ se cumple $2^\kappa = \kappa^+$. En particular, si $A \subset V_\omega$ se cumple la HCG.*

DEMOSTRACIÓN: Como $\alpha \leq \kappa$, también $\alpha^+ \leq \kappa^+$, luego $A \in L_{\kappa^+}[A]$. Podemos tomar $\delta < \kappa^+$ tal que $A \in L_\delta[A]$ y $\kappa \in L_\delta[A]$. Entonces

$$\mathcal{P}\kappa \subset \mathcal{P}L_\delta[A] \subset L_{\delta^+}[A] \subset L_{\kappa^+}[A],$$

luego $2^\kappa \leq |L_{\kappa^+}[A]| = \kappa^+$, luego $2^\kappa = \kappa^+$. Si $A \subset V_\omega = L_\omega[A]$, entonces $A \in L_{\omega+1}[A]$ y sirve $\alpha = \omega$. ■

La consistencia de la HCG En particular, el teorema anterior nos da que $V = L \rightarrow \text{HCG}$, luego, como ya hemos probado que si ZFC es consistente también lo es ZCF + $V = L$, concluimos que si ZFC es consistente, también lo es ZFC + HCG. ■

¹⁰Tanto da considerar KPI o ZF–AP.

Mediante un argumento de condensación más fino probamos un poco más:

Teorema 3.30 *Si $V = L[A]$ para un cierto $A \subset \omega_1$, se cumple la HCG.*

DEMOSTRACIÓN: Tenemos $A \subset L_{\omega_1}[A]$, luego $A \in \mathcal{P}D_A L_{\omega_1}[A] = L_{\omega_1+1}[A]$, y el teorema anterior nos da que $2^\kappa = \kappa^+$ siempre que $\kappa \geq \aleph_1$. Así pues, basta probar que $2^{\aleph_0} = \aleph_1$. A su vez, para ello basta probar que $\mathcal{P}\omega \subset L_{\omega_1}[A]$.

Tomemos $a \in \mathcal{P}\omega$. El teorema 3.28 nos da que $a \in L_{\omega_2}[A]$. Consideremos $N = N(\omega \cup \{a, \omega, \omega_1, A\}) \prec L_{\omega_2}[A]$. Claramente $|N| = \aleph_0$.

Observemos que si α es un ordinal numerable, entonces α es numerable ^{$L_{\omega_2}[A]$} . En efecto, si $f : \omega \rightarrow \alpha$ biyectiva, entonces $f \subset \omega \times \alpha \subset L_{\omega_1}[A]$, luego por 3.28 tenemos que $f \in L_{\omega_2}[A]$.

Por consiguiente, si $\alpha \in N$ cumple $\alpha < \omega_1$, entonces $L_{\omega_2}[A] \models [\alpha]$ es numerable, luego lo mismo vale en N , luego existe $f \in N$ tal que $N \models [f] : \omega \rightarrow \alpha$ biyectiva, luego lo mismo vale en $L_{\omega_2}[A]$, luego $f : \omega \rightarrow \alpha$ biyectiva. Para cada $n \in \omega$ se cumple $L_{\omega_2}[A] \models [n] \in \omega$, luego N cumple lo mismo, luego existe un $y \in N$ tal que $N \models ([n], [y]) \in [f]$, luego $L_{\omega_2}[A]$ cumple lo mismo, luego $(n, y) \in f$, es decir, $f(n) \in N$, luego $\alpha \subset N$.

Con esto hemos probado que $\omega_1 \cap N$ es un conjunto transitivo, luego es un ordinal. Usando que en $L_{\omega_2}[A]$ el siguiente de un ordinal numerable es numerable concluimos que $\lambda = \omega_1 \cap N$ es, de hecho, un ordinal límite (numerable).

Sea $\pi : N \rightarrow M$ la función colapsante. Es claro que $\pi(a) = a$, así como que π fija a todos los elementos de λ , luego,

$$\pi(\omega_1) = \{\pi(\alpha) \mid \alpha \in \omega_1 \cap N\} = \lambda.$$

Como $A \subset \omega_1$, $\pi(A) = \{\pi(\alpha) \mid \alpha \in A \cap N\} = A \cap \lambda$, luego M es un modelo transitivo numerable de $KPI+V = L[A \cap \lambda]$. Esto implica que $M = L_\delta[A \cap \lambda]$, para cierto $\delta < \omega_1$.

Así pues, tenemos que $a \in L_{\omega_1}[A \cap \lambda]$, con $\lambda < \omega_1$. Ahora bien, es claro que $A \cap \lambda \in L_{\lambda+1}[A] \subset L_{\omega_1}[A]$ y éste es un modelo transitivo de KPI, luego por 3.11 concluimos que $L_{\omega_1}[A \cap \lambda] \subset L_{\omega_1}[A]$. Así pues, $a \in L_{\omega_1}[A]$. ■

Yendo más lejos en esta línea podemos demostrar que el axioma de constructibilidad implica los diamantes de Jensen [TC 6.27].

Teorema 3.31 (V=L) *Si κ es un cardinal infinito, se cumple $\Diamond_{\kappa^+}^+$.*

DEMOSTRACIÓN: Definimos $f : \kappa^+ \rightarrow \kappa^+$ como la función que a cada $\alpha < \kappa^+$ le asigna el menor ordinal $f(\alpha)$ tal que $\alpha \in L_{f(\alpha)} \prec L_{\kappa^+}$. Definimos $S_\alpha = \mathcal{P}\alpha \cap L_{f(\alpha)}$ y vamos a probar que $\{S_\alpha\}_{\alpha < \kappa^+}$ es una sucesión $\Diamond_{\kappa^+}^+$.

Ciertamente se cumple que $S_\alpha \subset \mathcal{P}\alpha$ y que $|S_\alpha| < \kappa^+$. Tomamos $X \subset \kappa^+$ y basta probar que existe un C c.n.a. en κ^+ tal que para todo $\alpha \in C$ se cumple $X \cap \alpha \in S_\alpha$ y $C \cap \alpha \in S_\alpha$.

Definimos como sigue una sucesión $\{N_\alpha\}_{\alpha < \kappa^+}$:

$$N_0 = N(\kappa \cup \{\kappa, \kappa^+, X\}) \prec L_{\kappa^{++}}, \quad N_{\alpha+1} = N(N_\alpha \cup \{\alpha, N_\alpha\}) \prec L_{\kappa^{++}},$$

$$N_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} N_\delta.$$

Aquí es importante que los núcleos de Skolem se calculan mediante funciones de Skolem definibles, con lo que se cumple el teorema 3.27, es decir, N_0 es el menor submodelo elemental de $L_{\kappa^{++}}$ que contiene a $\kappa \cup \{\kappa, \kappa^+, X\}$ y $N_{\alpha+1}$ es el menor submodelo elemental que contiene a $N_\alpha \cup \{\alpha, N_\alpha\}$.

Notemos que $N_\alpha \prec L_{\kappa^{++}}$. El caso límite se prueba fácilmente a partir de [TC 11.22]. Similarmente se prueba que si $\alpha < \beta < \kappa^+$ entonces $N_\alpha \prec N_\beta$. Es inmediato que $|N_\alpha| < \kappa^+$ y que $\alpha \subset N_\alpha$.

Por 3.28 se cumple que si $\delta < \kappa^{++}$ entonces $\mathcal{P}L_\delta[A] \subset L_{\kappa^{++}}$. En particular todo ordinal $\delta < \kappa^+$ tiene cardinal $\leq \kappa$ en $L_{\kappa^{++}}$ (porque toda $f : \kappa \rightarrow \delta$ suprayectiva está en $L_{\kappa^{++}}$). Esto significa que κ^+ es el cardinal siguiente a κ en $L_{\kappa^{++}}$.

Se cumple que $\lambda_\alpha = N_\alpha \cap \kappa^+ \in \kappa^+$. En efecto, basta probar que la intersección es transitiva. Si $\beta \in N_\alpha \cap \kappa^+$, existe $f : \kappa \rightarrow \beta$ suprayectiva, y de hecho se cumple que $f \in L_{\kappa^{++}}$, luego por [TC 11.22] existe $f \in N_\alpha$ tal que $f : \kappa \rightarrow \beta$ suprayectiva.

Para cada $\gamma \in \beta$ existe un $\delta \in \kappa \subset N_\alpha$ tal que $\gamma = f(\delta)$ y, puesto que $\forall x \in N_\alpha \ N_\alpha \models x = f(\delta)$, al pasar esto a $L_{\kappa^{++}}$ llegamos a que $x = f(\delta) = \gamma$, luego $\gamma \in N_\alpha$, luego $\beta \subset N_\alpha \cap \kappa^+$.

La sucesión $\{\lambda_\alpha\}_{\alpha < \kappa^+}$ es normal, pues, como $N_\alpha, \kappa^+ \in N_{\alpha+1}$, tenemos también que $N_\alpha \cap \kappa^+ \in N_{\alpha+1}$ (usamos que $N_{\alpha+1} \prec L_{\kappa^{++}}$ y que éste es cerrado para intersecciones), luego $\lambda_\alpha < \lambda_{\alpha+1}$,

Definimos

$$C = \{\alpha < \kappa^+ \mid \lambda_\alpha = \alpha\},$$

que es c.n.a. en κ^+ .

Vamos a ver que C es el conjunto que necesitamos, es decir, que si $\alpha \in C$ entonces $X \cap \alpha \in S_\alpha$ y $C \cap \alpha \in S_\alpha$. Fijamos, pues, $\alpha \in C$. Así $\alpha = \lambda_\alpha > \kappa$.

Sea $\pi : N_\alpha \rightarrow M$ el colapso transitivo de N_α . Como $\alpha \subset N_\alpha$, tenemos que π fija a los ordinales menores que α , luego

$$\pi(\kappa) = \kappa, \quad \pi(\kappa^+) = \lambda_\alpha = \alpha, \quad \pi(X) = X \cap \alpha.$$

Como $N_\alpha \models V = L$, lo mismo vale en M , luego existe un $\beta < \kappa^+$ tal que $M = L_\beta$.

Veamos ahora que $\beta < f(\alpha)$.

En efecto, por una parte observamos que $N_\alpha \models |\kappa^+| > \kappa$, luego, aplicando π , resulta que $L_\beta \models |\alpha| > \kappa$. Por otro lado, el teorema 3.28 nos permite concluir que $L_{\kappa^+} \models |\alpha| \leq \kappa$, luego $L_{f(\alpha)} \models |\alpha| \leq \kappa$, y esto sólo puede ocurrir si $\beta < f(\alpha)$.

Ahora ya es inmediato que $X \cap \alpha \in L_\beta \subset L_{f(\alpha)}$, luego $X \cap \alpha \in S_\alpha$. Por último basta probar que la sucesión $\{\lambda_\delta\}_{\delta < \alpha}$ está en $L_{f(\alpha)}$, pues esto implica que

$$C \cap \alpha = \{\delta < \alpha \mid \lambda_\delta = \delta\} \in L_{f(\alpha)} \cap \mathcal{P}\alpha = S_\alpha.$$

Para ello definimos modelos $\{N'_\delta\}_{\delta < \alpha}$ como sigue:

$$N'_0 = N(\kappa \cup \{\kappa, \alpha, X \cap \alpha\}) \prec L_\beta, \quad N'_{\delta+1} = N(N'_\delta \cup \{\delta, N'_\delta\}) \prec L_\beta,$$

$$N'_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} N'_\delta.$$

Ahora, como N_0 es el menor submodelo elemental de N_α que contiene a $\kappa \cup \{\kappa, \kappa^+, X\}$, es claro que $\pi(N_0) = \pi[N_0]$ es el menor submodelo elemental de L_β que contiene a $\kappa \cup \{\kappa, \alpha, X \cap \alpha\}$, es decir, que $\pi(N_0) = N'_0$. Razonando por inducción concluimos que $N'_\delta = \pi(N_\delta)$. Además, como π fija a los ordinales $< \alpha$, es claro que $\lambda_\delta = N_\delta \cap \kappa^+ = N'_\delta \cap \alpha$.

Así basta tener en cuenta que la sucesión $\{N'_\delta\}_{\delta < \alpha}$ puede definirse en $L_{f(\alpha)}$ a partir de L_β , κ , α y $X \cap \alpha$, y a partir de ella se define $\{\lambda_\delta\}_{\delta < \alpha} \in L_{f(\alpha)}$. ■

En particular, por [TC 6.32] tenemos que $V = L$ implica \Diamond_E para todo conjunto estacionario $E \subset \kappa^+$, y por [TC 9.20] y [TC 9.26] existen κ^+ -árboles de Kurepa para todo cardinal infinito κ y de Suslin si además κ es regular.

No es cierto que $V = L$ implique \Diamond_κ^+ para todo cardinal regular κ . Si κ es inaccesible no tiene por qué ser cierto. Sin embargo, sí que puede probarse \Diamond_E para todo conjunto estacionario $E \subset \kappa$ siempre que κ es regular no numerable. La prueba es algo más compleja. Conviene demostrar un resultado previo:

Teorema 3.32 *Sea κ un cardinal regular no numerable, $\lambda > \kappa$ un ordinal límite y $X \subset L_\lambda$ un conjunto tal que $|X| < \kappa$. Entonces existe $N \prec L_\lambda$ tal que $X \subset N$, $|N| < \kappa$ y $N \cap \kappa \in \kappa$.*

DEMOSTRACIÓN: Vamos a construir una sucesión $\{N_n\}_{n \in \omega}$ de submodelos elementales de L_λ , todos ellos de cardinal menor que κ . Partimos del núcleo de Skolem $N_0 = N(X)$. Supuesto definido N_n , llamamos $\alpha_n = \bigcup(N_n \cap \kappa)$. Como $|N_n \cap \kappa| < \kappa$ y κ es regular, tenemos que $\alpha_n < \kappa$, luego $N_{n+1} = N(N_n \cup \alpha_n)$ tiene también cardinal $< \kappa$. Por último llamamos $N = \bigcup_{n \in \omega} N_n$. Usando [TC 11.21] se comprueba inmediatamente que $N \prec L_\lambda$, y por la regularidad de κ es claro que $|N| < \kappa$. También es obvio que $X \subset N$. Además:

$$N \cap \kappa = \bigcup_{n \in \omega} (N_n \cap \kappa) \subset \bigcup_{n \in \omega} \alpha_n \subset \bigcup_{n \in \omega} N_{n+1} \cap \kappa = N \cap \kappa.$$

Por lo tanto, $N \cap \kappa = \bigcup_{n \in \omega} \alpha_n \in \kappa$, pues κ es regular no numerable. ■

Teorema 3.33 ($V = L$) *Si κ es un cardinal regular no numerable y E es un conjunto estacionario en κ , se cumple \Diamond_E .*

DEMOSTRACIÓN: Definimos por recurrencia una sucesión $\{(A_\alpha, C_\alpha)\}_{\alpha \in E}$ de subconjuntos de α . Concretamente, dado $\lambda \in E$ y supuesta definida la sucesión $\{(A_\alpha, C_\alpha)\}_{\alpha \in E \cap \lambda}$, si λ es un ordinal límite y existe un par (A, C) tal que $C \subset \lambda$ es c.n.a. en λ y $\bigwedge \alpha \in C \cap E A \cap \alpha \neq A_\alpha$, entonces tomamos como (A_λ, C_λ) el mínimo par que cumple esto (respecto al buen orden constructible), y en caso contrario tomamos $A_\lambda = C_\lambda = \emptyset$.

Vamos a probar que la sucesión $\{A_\alpha\}_{\alpha \in E}$ cumple \Diamond_E , pero antes observemos que el conjunto A_α está definido por una fórmula $\phi(x, \alpha, \kappa, E)$, en el sentido de que en $ZFC + V = L$ se demuestra que si κ es un cardinal regular no numerable y E es un conjunto estacionario en κ entonces existe un único x que cumple $\phi(x, \alpha, \kappa, E)$ y dicho x es necesariamente el A_α que acabamos de definir. Más aún, el teorema de recursión que hemos empleado en la definición es demostrable en $ZF-AP$, por lo que la definición es válida en la teoría T determinada por $ZF-AP + V = L$. (En T no puede demostrarse que existan cardinales no numerables, pero sí que podemos probar que si κ es un cardinal regular no numerable y E es estacionario en κ entonces existe una (única) sucesión $\{A_\alpha\}_{\alpha \in E}$ en las condiciones indicadas.)

Ciertamente tenemos que $A_\alpha \subset \alpha$, y tenemos que probar que, fijado $A \subset \kappa$, el conjunto $\{\alpha \in E \mid A \cap \alpha = A_\alpha\}$ es estacionario en κ . En caso contrario, existe un C c.n.a. en κ tal que

$$\{\alpha \in E \mid A \cap \alpha = A_\alpha\} \cap C = \emptyset.$$

Podemos tomar el mínimo par (A, C) para el que sucede esto (respecto del buen orden constructible). Equivalentemente, tenemos que

$$\bigwedge \alpha \in C \cap E A \cap \alpha \neq A_\alpha.$$

Por 3.28 tenemos que L_{κ^+} contiene a todos los conjuntos $\mathcal{P}\alpha$ para todo $\alpha \leq \kappa$. En particular $E \in L_{\kappa^+}$. Como L_{κ^+} es un modelo de T , podemos considerar la relativización $(\{(A_\alpha, C_\alpha)\}_{\alpha \in E})^{L_{\kappa^+}}$.

Como “ser una sucesión de pares ordenados con dominio E ” es absoluto, la relativización es en realidad una sucesión de la forma $\{(A_\alpha^{L_{\kappa^+}}, C_\alpha^{L_{\kappa^+}})\}_{\alpha \in E}$. Como en T se demuestra que $A_\alpha \subset \alpha$ y $C_\alpha \subset \alpha$, se cumple la relativización de esto a L_{κ^+} , es decir, $A_\alpha^{L_{\kappa^+}} \subset \alpha$, $C_\alpha^{L_{\kappa^+}} \subset \alpha$.

Veamos por inducción sobre $\alpha \in E$ que $A_\alpha^{L_{\kappa^+}} = A_\alpha$ y $C_\alpha^{L_{\kappa^+}} = C_\alpha$. Suponemos que esto es cierto para todo $\alpha \in E \cap \lambda \in E$ y distinguimos casos:

Si λ no es un ordinal límite, como en T se demuestra que si λ no es un límite entonces $A_\lambda = C_\lambda = \emptyset$, al relativizar (teniendo en cuenta que ser un ordinal límite es absoluto) concluimos que $A_\lambda^{L_{\kappa^+}} = C_\lambda^{L_{\kappa^+}} = \emptyset = A_\lambda = C_\lambda$.

Supongamos ahora que λ es un ordinal límite. Si existe un par (A, C) tal que $C \subset \lambda$ es c.n.a. en λ y $\bigwedge \alpha \in C \cap E A \cap \alpha \neq A_\alpha$, todo esto es absoluto (y aquí usamos la hipótesis de inducción, según la cual si $\alpha \in C \subset \lambda$ tenemos la igualdad $A_\alpha^{L_{\kappa^+}} = A_\alpha$), luego se cumple en L_{κ^+} . Más aún, cualquier par en estas

condiciones está en L_{κ^+} y, como el buen orden constructible también es absoluto, el menor de tales pares en L_{κ^+} (que es por definición $(A_\lambda^{L_{\kappa^+}}, C_\lambda^{L_{\kappa^+}})$), coincide con el menor de tales pares (que es (A_λ, C_λ)), luego tenemos la igualdad.

Por último, si no existe ningún par en las condiciones indicadas, tampoco existe en L_{κ^+} , porque las condiciones son absolutas, luego nuevamente llegamos a que $A_\lambda^{L_{\kappa^+}} = C_\lambda^{L_{\kappa^+}} = \emptyset = A_\lambda = C_\lambda$.

Así pues, $\{(A_\alpha, C_\alpha)\}_{\alpha \in E} \in L_{\kappa^+}$. Por otra parte, también tenemos que $(A, C) \in L_{\kappa^+}$. Más aún, se trata del mínimo par en L_{κ^+} (porque todos los pares posibles están en L_{κ^+} y el orden constructible es absoluto) tal que

$$\bigwedge \alpha \in C \cap E \ A \cap \alpha \neq A_\alpha,$$

donde usamos que A_α es absoluto.

En el caso $E = \kappa$, en este punto de la prueba bastaría aplicar el teorema anterior para obtener un $N \prec L_{\kappa^+}$ que cumpla $\{\kappa, A, C\} \subset N$, $|N| < \kappa$ y $\lambda = N \cap \kappa \in \kappa$. En el caso general necesitamos refinar como sigue la construcción para asegurar que $\lambda \in E$:

Construimos una sucesión $\{N_\delta\}_{\delta < \kappa}$ de modelos $N_\delta \prec L_{\kappa^+}$ tales que $|N_\delta| < \kappa$. Tomamos N_0 según el teorema anterior, de modo que $\{\kappa, A, C, E\} \subset N_0$ y $\lambda_0 = N_0 \cap \kappa \in \kappa$. Supuesto definido N_δ tal que $\lambda_\delta = N_\delta \cap \kappa \in \kappa$, tomamos $N_{\delta+1}$ según el teorema anterior de modo que $N_\delta \cup \{\lambda_\delta\} \subset N_{\delta+1}$. Así $\lambda_\delta < \lambda_{\delta+1}$. Por último, supuestos definidos $\{N_\delta\}_{\delta < \eta}$, donde $\eta < \kappa$ es un ordinal límite, tomamos $N_\eta = \bigcup_{\delta < \eta} N_\delta$, que es un submodelo elemental de L_{κ^+} (se sigue de [TC 11.21]) y además

$$\lambda_\eta = N_\eta \cap \kappa = \bigcup_{\delta < \eta} (N_\delta \cap \kappa) = \bigcup_{\delta < \eta} \lambda_\delta < \kappa,$$

porque κ es regular. Así pues, la sucesión $\{\lambda_\delta\}_{\delta < \kappa}$ es normal, luego su rango es c.n.a. en κ , luego existe un $\delta < \kappa$ tal que $\lambda = \lambda_\delta \in E$. Llamamos $N = N_\delta$, con lo que tenemos que $\kappa, A, C \in N$, $N \prec L_{\kappa^+}$, $|N| < \kappa$ y además $\lambda = N \cap \kappa \in E$.

Sea $\pi : N \rightarrow M$ la función colapsante de Mostowski. Como trivialmente se restringe a la identidad en λ , es obvio que $\pi(\kappa) = \lambda$, $\pi(A) = A \cap \lambda$, $\pi(C) = C \cap \lambda$ y $\pi(E) = E \cap \lambda$ (en particular vemos que λ es un ordinal límite, por serlo κ).

Sea $\phi(x, \alpha, \kappa, E) \equiv x = A_\alpha$. Si $\alpha \in E \cap \lambda$, tenemos $(\bigvee x \phi(x, \alpha, \kappa, E))^{L_{\kappa^+}}$, luego $(\bigvee x \phi(x, \alpha, \kappa, E))^N$, que es lo mismo que $\bigvee x \in N \phi^N(x, \alpha, \kappa, E)$, luego $\bigvee x \in N \phi^{L_{\kappa^+}}(x, \alpha, \kappa, E)$, y esto implica que $A_\alpha \in N$ y, teniendo en cuenta que $A_\alpha \subset \alpha \subset \lambda$, vemos que $A_\alpha = \pi(A_\alpha) \in M$.

Más aún, como $\phi^{L_{\kappa^+}}(A_\alpha, \alpha, \kappa, E)$, también $\phi^N(A_\alpha, \alpha, \kappa, E)$, luego, aplicando π , tenemos que $\phi^M(A_\alpha, \alpha, \lambda, E \cap \lambda)$, es decir, que A_α cumple en M la misma definición que A_α , pero con λ en lugar de κ y $E \cap \lambda$ en lugar de E .

Consideremos ahora la fórmula $\psi(A, C, \kappa, E) \equiv (A, C)$ es el mínimo par (respecto a \trianglelefteq) tal que $A \subset \kappa$, C es c.n.a. en κ y $\bigwedge \alpha \in C \cap E \ A \cap \alpha \neq A_\alpha$.

Se cumple $\psi(A, C, \kappa, E)$, y es claro que esto es absoluto para L_{κ^+} , es decir, que $\psi^{L_{\kappa^+}}(A, C, \kappa, E)$, luego $\psi^N(A, C, \kappa, E)$, y aplicando π llegamos a que

$\psi^M(A \cap \lambda, C \cap \lambda, \lambda, E \cap \lambda)$. Esto significa que $(A \cap \lambda, C \cap \lambda)$ es el mínimo par respecto al orden \leq tal que $A \cap \lambda \subset \lambda$, $C \cap \lambda$ es c.n.a. en λ y

$$\bigwedge \alpha \in C \cap E \cap \lambda \ A \cap \alpha \neq A_\alpha,$$

donde usamos que si $\alpha < \lambda$, el A_α definido en M a partir de λ y $E \cap \lambda$ es precisamente A_α .

Ahora bien, por la propia definición de la sucesión $\{A_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ (y aquí usamos que $\lambda \in E$) esto significa que $(A \cap \lambda, C \cap \lambda) = (A_\lambda, C_\lambda)$, luego en particular $A \cap \lambda = A_\lambda$. Por otra parte, como $C \cap \lambda$ no está acotado en λ y C es c.n.a. en κ , resulta que $\lambda \in C \cap E$, y por la elección de (A, C) tenemos que $A \cap \lambda \neq A_\lambda$, contradicción. ■

Se cumple que $V = L$ implica también los principios \square_κ para todo cardinal infinito κ , pero la prueba es mucho más complicada.

3.7 Cardinales inaccesibles en L

Ya hemos visto que “ser un cardinal” es una propiedad Π_1 en ZFC, y también lo es “ser un cardinal débilmente inaccesible”:

$$\begin{aligned} \kappa \text{ d.i.} \leftrightarrow & \kappa \text{ es un cardinal} \wedge \bigwedge \alpha \in \kappa \forall \mu \in \kappa (\alpha \in \mu \wedge \mu \text{ es un cardinal}) \\ & \wedge \bigwedge x (x \subset \kappa \wedge \bigwedge \alpha \in \kappa \forall \beta \in x \ \alpha \in \beta \rightarrow \neg \forall f (f : x \longrightarrow \kappa \text{ biyectiva})). \end{aligned}$$

Por lo tanto, si κ es un cardinal (débilmente inaccesible), también lo es en cualquier modelo transitivo de ZFC al que pertenezca. En particular, si κ es un cardinal débilmente inaccesible, entonces κ es débilmente inaccesible L , pero como en L se cumple la HCG, resulta que κ es fuertemente inaccesible L .

A su vez, esto implica que si $ZFC + \forall \kappa$ débilmente inaccesible es consistente, también lo es $ZFC + \forall \kappa$ fuertemente inaccesible.

Vemos, pues, que “ser débilmente inaccesible” es una propiedad más débil que “ser fuertemente inaccesible”, en el sentido de que un cardinal puede ser débilmente inaccesible sin ser fuertemente inaccesible, o incluso puede ocurrir que existan cardinales débilmente inaccesibles y no existan cardinales fuertemente inaccesibles, pero en cuanto a consistencia, ambas propiedades son equivalentes: es consistente que exista un cardinal débilmente inaccesible si y sólo si lo es que exista un cardinal fuertemente inaccesible. Más aún:

Teorema 3.34 *Si κ es un cardinal débilmente inaccesible, $L_\kappa \models ZFC$.*

DEMOSTRACIÓN: Hemos visto que κ es fuertemente inaccesible L , luego $(H(\kappa) \models ZFC)^L$ (por la observación tras el teorema 2.34), pero por 3.24 tenemos que $H(\kappa)^L = L_\kappa^L = L_\kappa$, luego, teniendo en cuenta que $M \models ZFC$ es Δ_1 , luego absoluto, concluimos que $L_\kappa \models ZFC$. ■

Así pues,

$$\forall \kappa \ \kappa \text{ débilmente inaccesible} \rightarrow \text{MBF} \rightarrow \text{Consis ZFC},$$

y todas las consecuencias que hemos extraído sobre la existencia de cardinales fuertemente inaccesibles se aplican también a los cardinales débilmente inaccesibles: en ZFC no puede probarse que existan, y no se puede probar que sea consistente que existan ni siquiera suponiendo la consistencia de ZFC.

En el resto de esta sección vamos a estudiar la situación inversa: que κ sea un cardinal inaccesible L no implica necesariamente que κ sea débilmente inaccesible, o ni siquiera un cardinal. Empezamos con un resultado técnico:

Teorema 3.35 *Si $\alpha \geq \omega$ es un ordinal numerable, existe un $a \subset \omega$ tal que α es numerable $^{L[a]}$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $R \subset \omega \times \omega$ un buen orden en ω de ordinal α . Sea $g \in L$ tal que $g : \omega \times \omega \longrightarrow \omega$ biyectiva y sea $a = g[R] \subset \omega$. Entonces $a \in L[a]$ y $g \in L \subset L[a]$, luego $R = g^{-1}[a] \in L[a]$, luego la semejanza entre (ω, R) y α tiene que estar en $L[a]$, luego α es numerable $^{L[a]}$. ■

Veamos ahora una condición suficiente para que \aleph_1 sea inaccesible L :

Teorema 3.36 *Si $\bigwedge a \subset \omega$ $\aleph_1^{L[a]} < \aleph_1$, entonces \aleph_1 es inaccesible L .*

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que \aleph_1 no es inaccesible L . En cualquier caso es un cardinal regular no numerable L , luego que no sea inaccesible equivale a que tiene un anterior, es decir, a que existe $\alpha < \aleph_1$ tal que $\aleph_1 = (\alpha^+)^L$. Por el teorema anterior existe un $a \subset \omega$ tal que α es numerable $^{L[a]}$.

Basta probar que $\aleph_1 = \aleph_1^{L[a]}$. A su vez, esto equivale a probar que si $\beta < \aleph_1$, entonces β es numerable $^{L[A]}$, con lo que \aleph_1 será el menor ordinal no numerable $^{L[a]}$. Ahora bien, tenemos que $\beta < (\alpha^+)^L$, luego existe $f \in L$ tal que $f : \alpha \longrightarrow \beta$ suprayectiva, pero entonces $f \in L[a]$ y, como α es numerable $^{L[a]}$, lo mismo le sucede a β . ■

Nota Que \aleph_1 sea inaccesible en L implica en particular que

$$\aleph_0 < \aleph_1^L < \aleph_2^L < \dots < \aleph_\omega^L < \dots < \aleph_1,$$

y, en general, que todos los cardinales que podemos definir y demostrar en ZFC que son menores que cualquier cardinal fuertemente inaccesible, son en L ordinales numerables. Más adelante demostraremos que si es consistente que exista un cardinal inaccesible, también lo es que \aleph_1 sea inaccesible L . ■

Vamos a dar una condición suficiente para que \aleph_2 sea inaccesible L . Nos apoyamos en el resultado siguiente:

Teorema 3.37 *Existe un $A \subset \omega_1$ tal que $\aleph_1^{L[A]} = \aleph_1$.*

DEMOSTRACIÓN: Para cada $\alpha < \omega_1$ sea $a_\alpha \subset \omega$ tal que α es numerable $^{L[a_\alpha]}$. Sea $B = \bigcup_{\alpha < \omega_1} \{\alpha\} \times a_\alpha \subset \omega_1 \times \omega$. Sea $f \in L$ tal que $f : \omega_1 \times \omega \longrightarrow \omega_1$ biyectiva.

El conjunto $A = f[B]$ cumple lo pedido, pues $A \in L[A]$, luego $B \in L[A]$, luego, para cada $\alpha < \omega_1$, se cumple $a_\alpha \in L[A]$, luego α es numerable $^{L[A]}$, luego ω_1 es el menor ordinal no numerable $^{L[A]}$. ■

Teorema 3.38 Si \aleph_2 no es inaccesible^L, entonces existe $A \subset \omega_1$ de manera que $\aleph_1^{L[A]} = \aleph_1$ y $\aleph_2^{L[A]} = \aleph_2$.

DEMOSTRACIÓN: La hipótesis significa que $\aleph_2 = (\alpha^+)^L$. Claramente ha de ser $|\alpha| = \aleph_1$. Sea $R \subset \omega_1 \times \omega_1$ un buen orden en ω_1 de ordinal α . Sea $f \in L$ tal que $f : \omega_1 \times \omega_1 \longrightarrow \omega_1$ biyectiva y sea $A_0 = f[R] \subset \omega_1$. Sea $A_1 \subset \omega_1$ tal que $\aleph_1^{L[A_1]} = \aleph_1$. Sea $A_2 = (\{0\} \times A_0) \cup (\{1\} \times A_1)$. Sea $g \in L$ tal que $g : 2 \times \omega_1 \longrightarrow \omega_1$ biyectiva y sea $A = g[A_2] \subset \omega_1$.

Claramente, A_0 y A_1 están en $L[A]$, luego también $R \in L[A]$. Del hecho de que $A_1 \in L[A]$ se sigue que $L[A_1] \subset L[A]$, y de aquí que $\aleph_1^{L[A]} = \aleph_1$.

Por otra parte, del hecho de que $R \in L[A]$ se sigue que $|\alpha|^{L[A]} = \aleph_1$. Si $\beta < \omega_2$, entonces $\beta < (\alpha^+)^L$, luego existe $h \in L$ tal que $h : \alpha \longrightarrow \beta$ suprayectiva, la cual nos permite construir $j \in L[A]$ tal que $j : \omega_1 \longrightarrow \beta$ suprayectiva. Esto implica que no hay cardinales^{L[A]} entre \aleph_1 y \aleph_2 , luego $\aleph_2^{L[A]} = \aleph_2$. ■

En ZFC se demuestra [TC 9.10] la existencia de \aleph_1 -árboles de Aronszajn, mientras que según [TC 9.12] la hipótesis del continuo $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ implica la existencia de \aleph_2 -árboles de Aronszajn. Cabe preguntarse si es consistente con ZFC que no existan \aleph_2 -árboles de Aronszajn, y a este respecto tenemos el hecho siguiente:

Teorema 3.39 Si no existen \aleph_2 -árboles de Aronszajn, entonces \aleph_2 es un cardinal inaccesible^L.

DEMOSTRACIÓN: Si \aleph_2 no es inaccesible^L, por el teorema anterior existe $A \subset \omega_1$ tal que $\aleph_1^{L[A]} = \aleph_1$ y $\aleph_2^{L[A]} = \aleph_2$. Por 3.30 sabemos que en $L[A]$ se cumple la hipótesis del continuo generalizada, pero esto implica que existe un (\aleph_2 -árbol de Aronszajn)^{L[A]} (X, \leq). Más aún, según la prueba de [TC 9.12], podemos tomar X formado por aplicaciones inyectivas de ordinales $< \omega_2$ en ω_1 con el orden dado por la inclusión.

Del hecho de que $\aleph_1^{L[A]} = \aleph_1$ y $\aleph_2^{L[A]} = \aleph_2$ se sigue inmediatamente que (X, \leq) es un \aleph_2 -árbol, y no puede tener caminos, pues un camino daría lugar a una aplicación inyectiva de ω_2 en ω_1 . Por consiguiente, es un \aleph_2 -árbol de Aronszajn. ■

Esto implica que no podemos aspirar a demostrar que, si ZFC es consistente, también lo es ZFC + no existen \aleph_2 -árboles de Aronszajn, pues esto implicaría la consistencia de ZFC + existe un cardinal inaccesible. Por lo tanto, para demostrar la consistencia de que no existan \aleph_2 -árboles de Aronszajn es necesario suponer al menos que es consistente ZFC más la existencia de un cardinal inaccesible. En realidad, no siquiera esto es suficiente, y hace falta una hipótesis aún más fuerte.

Sabemos que \Diamond^+ (y en particular $V = L$) implica la existencia de un árbol de Kurepa. Ahora probaremos que la no existencia de árboles de Kurepa implica también la existencia de un cardinal inaccesible^L, por lo que la situación es la misma que con la no existencia de \aleph_2 -árboles de Aronszajn. Para ello necesitamos generalizar el teorema 3.31:

Teorema 3.40 Si $V = L[A]$ con $A \subset \omega_1$ y κ es un cardinal infinito, entonces se cumple $\Diamond_{\kappa^+}^+$.

DEMOSTRACIÓN: Si $\kappa \geq \aleph_1$ la demostración de 3.31 vale con los mínimos cambios obvios. En efecto, en este caso tenemos que $A \subset \kappa$ y, como claramente $A \in L_{\omega_1+1}[A]$, también $A \in L_{\kappa^+}[A]$, y esto basta para justificar todas las aplicaciones de 3.28. Tomando $N_0 = N(\kappa \cup \{\kappa, \kappa^+, X, A\})$ tenemos que $A \in N_\alpha$ y $\pi(A) = A$, por lo que el colapso transitivo de N_α es de la forma $L_\beta[A]$, para cierto $\beta < \kappa^+$, y todo el argumento es válido.

Supongamos, pues, que $\kappa = \omega$. El problema principal es que no vamos a poder exigir que $A \in N_0$, porque necesitamos que los modelos N_α sean numerables, y eso hará que no podamos asegurar que sus colapsos sean de la forma $L_\beta[A]$. Por ello empezamos definiendo $f : \omega_1 \longrightarrow \omega_1$ como la función que a cada $\alpha < \omega_1$ le asigna el menor ordinal $f(\alpha)$ tal que $\alpha \in L_{f(\alpha)}[A \cap \alpha] \prec L_{\omega_1}[A \cap \alpha]$. Definimos $S_\alpha = \mathcal{P}\alpha \cap L_{f(\alpha)}[A \cap \alpha]$ y vamos a probar que $\{S_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ es una sucesión \Diamond^+ .

Para ello fijamos un $X \subset \omega_1$ y definimos¹¹

$$N_0 = N(\{\omega, \omega_1, X, A\}) \prec L_{\omega_2}[A], \quad N_{\alpha+1} = N(N_\alpha \cup \{\alpha, N_\alpha\}) \prec L_{\omega_2}[A],$$

$$N_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} N_\delta.$$

Así se cumple que todos los N_α son submodelos elementales numerables de $L_{\omega_2}[A]$, así como que $\alpha \subset N_\alpha$. El hecho de que $A \in L_{\omega_1+1}[A] \subset L_{\omega_2}[A]$ justifica las aplicaciones del teorema 3.28 análogas a las consideradas en 3.31 que nos permiten justificar que $\omega_1^{L_{\omega_2}[A]} = \omega_1$ y que $\lambda_\alpha = N_\alpha \cap \omega_1 \in \omega_1$. Se prueba igualmente que la sucesión $\{\lambda_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ es normal. Definimos el c.n.a.

$$C = \{\alpha \in \omega_1 \mid \lambda_\alpha = \alpha\},$$

y vamos a probar que cumple lo requerido por \Diamond^+ para el conjunto X . Para ello tomamos $\alpha \in C$. Como $\alpha = \lambda_\alpha$ es el mínimo ordinal $< \omega_1$ que no está en N_α y la función colapsante $\pi : N_\alpha \longrightarrow M$ fija a los ordinales menores que α , concluimos que

$$\pi(\omega_1) = \alpha, \quad \pi(A) = A \cap \alpha, \quad \pi(X) = X \cap \alpha.$$

Como $L_{\omega_2}[A] \models V = L[A]$, lo mismo vale para N_α y, aplicando π , concluimos que $M \models V = L[A \cap \alpha]$ y, como es un modelo transitivo numerable, existe un $\beta < \omega_1$ tal que $M = L_\beta[A \cap \alpha]$. En suma, ahora el colapso transitivo es

$$\pi : N_\alpha \longrightarrow L_\beta[A \cap \alpha].$$

Ahora necesitamos probar que $\beta < f(\alpha)$, y en este punto no podemos seguir el razonamiento de 3.31, porque no podemos aplicar el teorema 3.28 a $L_{\omega_1}[A \cap \alpha]$

¹¹Es fácil ver que es equivalente definir $N_0 = N(\{X\})$, pero cuesta menos exigir por definición que N_0 contenga a los otros conjuntos indicados que demostrar que los contiene.

(puesto que no tenemos que $V = L[A \cap \alpha]$). Esto nos lleva a distinguir dos casos (desde el principio de la prueba):

1) Existe un $\sigma < \omega_1$ tal que $\omega_1^{L[A \cap \sigma]} = \omega_1$. Para probar el teorema en este caso modificamos la definición de C :

$$C = \{\alpha \in \omega_1 \mid \alpha \geq \sigma \wedge \lambda_\alpha = \alpha\}.$$

Así resulta que α es numerable $^{L[A \cap \alpha]}$, pues lo es en $L[A \cap \sigma] \subset L[A \cap \alpha]$. (Notemos que $A \cap \sigma = (A \cap \alpha) \cap \sigma \in L[A \cap \alpha]$.) Esto nos permite aplicar 3.28 relativizado a $L[A \cap \alpha]$, lo que nos da que α es numerable $^{L_{\omega_1}[A \cap \alpha]}$, luego también es numerable $^{L_{f(\alpha)}[A \cap \alpha]}$. Por otro lado, el mismo argumento de 3.31 prueba que α no es numerable $^{L_\beta[A \cap \alpha]}$, y esto implica que $\beta < f(\alpha)$.

2) Para todo $\sigma < \omega_1$ se cumple $\omega_1^{L[A \cap \sigma]} < \omega_1$. En este caso, continuando la prueba donde la habíamos dejado, resulta que ω_1 es inaccesible en $L[A \cap \alpha]$. En efecto, no puede existir un $\theta < \omega_1$ tal que $\omega_1 = (\theta^+)^{L[A \cap \alpha]}$, pues θ es numerable en $L_{\omega_2}[A]$, luego, tomando un $\alpha' \in C$ tal que $\alpha, \theta < \alpha'$, también es numerable en $N_{\alpha'}$, luego en su colapso transitivo, que será de la forma $L_{\beta'}[A \cap \alpha']$, luego θ será numerable en $L[A \cap \alpha']$, luego $\omega_1^{L[A \cap \alpha']} = \omega_1$, contradicción.

Por lo tanto, en $L[A \cap \alpha]$ hay un conjunto no acotado de cardinales menores que ω_1 , todos los cuales seguirán siendo cardinales en $L_{\omega_1}[A \cap \alpha]$, luego en este modelo hay cardinales mayores que α , luego también los hay en $L_{f(\alpha)}[A \cap \alpha]$.

En cambio, todos los ordinales $\omega_1 < \delta < \omega_2$ tienen cardinal ω_1 en $L_{\omega_2}[A]$, luego en este modelo no hay cardinales mayores que ω_1 , luego en N_α no hay cardinales mayores que ω_1 , luego, aplicando π , en $L_\beta[A \cap \alpha]$ no hay cardinales mayores que α .

Esto implica que $\beta < f(\alpha)$, pues si fuera $f(\alpha) < \beta$, un cardinal mayor que α en $L_{f(\alpha)}[A \cap \alpha]$ lo sería en $L_{\omega_1}[A \cap \alpha]$ y también en $L[A \cap \alpha]$ (por 3.28 relativizado a $L[A \cap \alpha]$), luego no podría dejar de serlo en $L_\beta[A \cap \alpha]$.

A partir de aquí, la conclusión del razonamiento visto en 3.31 se adapta con los mínimos cambios obvios. ■

Con esto ya podemos probar:

Teorema 3.41 *Si no existen árboles de Kurepa, entonces \aleph_2 es un cardinal inaccesible en L .*

DEMOSTRACIÓN: Si \aleph_2 no es inaccesible en L , por 3.38 existe $A \subset \omega_1$ tal que $\aleph_1^{L[A]} = \aleph_1$ y $\aleph_2^{L[A]} = \aleph_2$. Por el teorema anterior se cumple $(\Diamond^+)^{L[A]}$, luego por [TC 9.26] existe $(K, \leq) \in L[A]$ que es un árbol de Kurepa $^{L[A]}$, es decir, un \aleph_1 -árbol con al menos \aleph_2 -caminos. Es inmediato que, al ser absolutos \aleph_1 y \aleph_2 , se cumple que (K, \leq) es un árbol de Kurepa. ■

Así pues, también para probar la consistencia de que no existan árboles de Kurepa se necesita suponer al menos la consistencia de que exista un cardinal inaccesible.

3.8 El teorema de Lévy-Shoenfield

Vamos a probar un resultado técnico que necesitaremos más adelante. Se trata de que las fórmulas Σ_1 son absolutas para los modelos $L[a]$, con $a \subset V_\omega$. Necesitamos algunos resultados previos.

Definición 3.42 Sea \mathcal{L} un lenguaje formal. Una sentencia de \mathcal{L} es una *sentencia $\Lambda\forall$* si es de la forma

$$\Lambda x_1 \cdots x_m \forall y_1 \cdots y_n \phi(x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n),$$

donde ϕ es una fórmula de \mathcal{L} sin cuantificadores.

Teorema 3.43 Sea $M_0 \subset M_1 \subset M_2 \subset \dots$ una cadena de modelos de un lenguaje \mathcal{L} de modo que cada M_i sea un submodelo de M_{i+1} . Sea

$$\theta = \Lambda x_1 \cdots x_m \forall y_1 \cdots y_n \phi(x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n)$$

una sentencia $\Lambda\forall$ de \mathcal{L} . Supongamos que para todos los $x_1, \dots, x_m \in M_k$ existen $y_1, \dots, y_n \in M_{k+1}$ tales que $M_{k+1} \models \phi[x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n]$ (en realidad basta con que esto se cumpla para todo k suficientemente grande). Sea $M = \bigcup_{k \in \omega} M_k$ (es decir, M es el modelo de \mathcal{L} cuyo universo es la unión de los universos de los modelos M_k y en el que los relatores funtores y constantes se interpretan extendiendo las interpretaciones en cada M_k). Entonces $M \models \theta$.

DEMOSTRACIÓN: Si tomamos $x_1, \dots, x_m \in M$, existe un $k \in \omega$ tal que $x_1, \dots, x_m \in M_k$, luego por hipótesis existen $y_1, \dots, y_n \in M_{k+1}$ tales que $M_{k+1} \models \phi[x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n]$. Como ϕ no tiene cuantificadores, una simple inducción sobre su longitud prueba que $M \models \phi[x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n]$. Es claro entonces que $M \models \theta$. ■

Teorema 3.44 (de la forma normal de Skolem) Sea ϕ una sentencia de un lenguaje forma \mathcal{L} . Entonces existe una sentencia $\Lambda\forall \bar{\phi}$ de un lenguaje formal $\bar{\mathcal{L}}$ que consta de los mismos signos de \mathcal{L} más ciertos relatores adicionales R_1, \dots, R_k de manera que

- a) Si U es un modelo de \mathcal{L} y $U \models \phi$, existen relaciones $\bar{R}_1, \dots, \bar{R}_k$ en U tales que si \bar{U} es el modelo de $\bar{\mathcal{L}}$ que extiende a U interpretando los relatores R_i como \bar{R}_i , entonces $\bar{U} \models \bar{\phi}$.
- b) Si \bar{U} es un modelo de $\bar{\mathcal{L}}$ tal que $\bar{U} \models \bar{\phi}$ y U es el modelo de \mathcal{L} que resulta de olvidar los relatores R_1, \dots, R_k , entonces $U \models \phi$.

DEMOSTRACIÓN: Podemos suponer que ϕ está en forma prenexa, es decir, que consta de una sucesión de cuantificadores seguida de una fórmula sin cuantificadores (toda fórmula es equivalente a otra fórmula en forma prenexa).

Por claridad vamos a suponer que

$$\phi = \forall u \Lambda v \forall w \Lambda xy \forall z \psi(u, v, w, x, y, z),$$

donde ψ no tiene cuantificadores, aunque el argumento es completamente general. La idea es sustituir

$$\begin{array}{ll} \forall z \psi(u, v, w, x, y, z) & \text{por } P(u, v, w, x, y), \\ \wedge xy \forall z \psi(u, v, w, x, y, z) & \text{por } Q(u, v, w), \\ \forall w \wedge xy \forall z \psi(u, v, w, x, y, z) & \text{por } R(u, v), \\ \forall v \forall w \wedge xy \forall z \psi(u, v, w, x, y, z) & \text{por } S(u) \end{array}$$

y adjuntar las “definiciones” de los relatores introducidos. Concretamente, definimos $\bar{\mathcal{L}}$ como el lenguaje que tiene los relatores adicionales P , Q , R y S y consideramos la sentencia

$$\begin{aligned} \wedge uvwxy(P(u, v, w, x, y) \leftrightarrow \forall z \psi(u, v, w, x, y, z)) \wedge \\ \wedge uvw(Q(u, v, w) \leftrightarrow \wedge xy P(u, v, w, x, y)) \wedge \wedge uv (R(u, v) \leftrightarrow \forall w Q(u, v, w)) \\ \wedge \wedge u(S(u) \leftrightarrow \wedge v R(u, v)) \wedge \forall u S(u). \end{aligned}$$

Claramente, esta sentencia es equivalente a

$$\begin{aligned} \wedge uvwxy \forall z (P(u, v, w, x, y) \leftrightarrow \psi(u, v, w, x, y, z)) \wedge \\ \wedge uvwxy(Q(u, v, w) \leftrightarrow P(u, v, w, x, y)) \wedge \wedge uv \forall w (R(u, v) \leftrightarrow Q(u, v, w)) \\ \wedge \wedge uv(S(u) \leftrightarrow R(u, v)) \wedge \forall u S(u). \end{aligned}$$

Cambiando las variables ligadas obtenemos otra sentencia equivalente:

$$\begin{aligned} \wedge uvwxy \forall p (P(u, v, w, x, y) \leftrightarrow \psi(u, v, w, x, y, p)) \wedge \\ \wedge uvwxy(Q(u, v, w) \leftrightarrow P(u, v, w, x, y)) \wedge \wedge uv \forall q (R(u, v) \leftrightarrow Q(u, v, q)) \\ \wedge \wedge uv(S(u) \leftrightarrow R(u, v)) \wedge \forall r S(r), \end{aligned}$$

que a su vez equivale a

$$\begin{aligned} \wedge uvwxy (\forall p (P(u, v, w, x, y) \leftrightarrow \psi(u, v, w, x, y, p)) \wedge \\ (Q(u, v, w) \leftrightarrow P(u, v, w, x, y)) \wedge \forall q (R(u, v) \leftrightarrow Q(u, v, q)) \\ \wedge (S(u) \leftrightarrow R(u, v)) \wedge \forall r S(r)), \end{aligned}$$

y ahora podemos extraer los particularizadores:

$$\begin{aligned} \wedge uvwxy \forall pqr ((P(u, v, w, x, y) \leftrightarrow \psi(u, v, w, x, y, p)) \wedge \\ (Q(u, v, w) \leftrightarrow P(u, v, w, x, y)) \wedge (R(u, v) \leftrightarrow Q(u, v, q)) \\ \wedge (S(u) \leftrightarrow R(u, v)) \wedge S(r)), \end{aligned}$$

con lo que hemos llegado a una sentencia $\bar{\phi}$ del tipo requerido. Por la construcción es claro que $\bar{\phi}$ es verdadera en un modelo de $\bar{\mathcal{L}}$ si y sólo si lo es ϕ . Ahora es fácil probar el teorema. ■

Teorema 3.45 *Sea M un modelo de un lenguaje formal $\mathcal{L} \in L$ que conste de relatores \in, R_1, \dots, R_k y constantes $\{c_n\}_{n \in \omega}$. Sean $E, \bar{R}_1, \dots, \bar{R}_k$ las interpretaciones en M de los relatores y supongamos que E es una relación bien fundada. Sea S un conjunto de sentencias $\wedge \vee$ de \mathcal{L} tal que $M \models S$. Entonces existe un modelo bien fundado N de \mathcal{L} tal que $N \models S$ y $N \in L[S]$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $S = \{\phi_n\}_{n \in \omega}$. Repitiendo sentencias o añadiendo alguna, podemos suponer que ϕ_n contiene a lo sumo las constantes $\{c_k\}_{k < n}$. Si S admite un modelo finito, éste será isomorfo a uno constructible y se cumplirá el teorema. Podemos suponer, pues, que S no admite modelos finitos.

Sea P el conjunto de las ternas (N, f, k) tales que $k \in \omega$, N es un modelo finito del lenguaje \mathcal{L}_k cuyos signos son los de \mathcal{L} excepto las constantes $\{c_n\}_{n \geq k}$, $N \subset \omega$ y $f : N \rightarrow \omega$ es una aplicación tal que si $x, y \in N$ cumplen $N(\in)(x, y)$, entonces $f(x) < f(y)$.

Consideramos en P el orden parcial dado por $(N, f, k) < (N', f', k')$ si N' es un submodelo de N , $f' \subset f$, $k' < k$ y para cada $r < k$, si

$$\phi_r = \bigwedge x_1 \cdots x_m \bigvee y_1 \cdots y_n \psi_r(x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n)$$

entonces para todos los $x_1, \dots, x_m \in N'$ existen $y_1, \dots, y_n \in M$ tales que

$$N \models \psi_r[x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n].$$

La definición de (P, \leq) es absoluta para modelos transitivos de ZFC–AP, por lo que $(P, \leq) \in L[S]$. Veamos que (P, \leq) no está bien fundado.

Sea X el conjunto de todos los $(N, f, k) \in P$ tales que existe un submodelo M' de M (como modelo de \mathcal{L}_k) y un isomorfismo $h : N \rightarrow M'$ tal que para todo $b \in N$ se cumpla $f(b) = \text{rang}_E h(b)$.

Claramente $X \neq \emptyset$, pues basta tomar $k \in \omega$, M' igual al conjunto de las interpretaciones en M de las constantes de \mathcal{L}_k , N un modelo isomorfo con $N \subset \omega$, $h : N \rightarrow M'$ el isomorfismo y $f : N \rightarrow \omega$ dada por $f(b) = \text{rang}_E h(b)$. Entonces $(N, f, k) \in X$.

El conjunto X no tiene mínimo, pues si $(N, f, k) \in X$ y $h : N \rightarrow M'$ es el isomorfismo dado por la definición de X , como $M \models S$, para todo $r \leq k$ tenemos que si

$$\phi_r = \bigwedge x_1 \cdots x_m \bigvee y_1 \cdots y_n \psi_r(x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n)$$

y $a_1, \dots, a_m \in M'$, existen $b_1, \dots, b_m \in M$ tales que

$$M \models \psi_r[a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_n].$$

Recorriendo todos los $r \leq k$ y todos los $a_1, \dots, a_m \in M'$ posibles, encontramos un número finito de elementos $b_i \in M$ que, junto con M' y $M(c_k)$ forman un submodelo M'' de M (como modelo de \mathcal{L}_{k+1}) tal que $M' \subset M''$. Tomamos $N' \subset \omega$ tal que $N \subset N'$, lo dotamos de estructura de modelo isomorfo a M'' a través de una biyección (que se convierte en isomorfismo) $h' : N' \rightarrow M''$ que extienda a h y definimos $f' : N' \rightarrow \omega$ mediante $f'(b) = \text{rang}_E h'(b)$. Claramente $(N', f', k+1) \in X$ y $(N', f', k+1) < (N, f, k)$.

Estar bien fundado es absoluto para modelos transitivos, luego (P, \leq) no está bien fundado $^{L[S]}$. Por consiguiente existe una sucesión $\{(N_k, f_k, n_k)\}_{k \in \omega} \in L[S]$ tal que

$$(N_0, f_0, k_0) > (N_1, f_1, k_1) > \dots$$

Sea $N = \bigcup_{k \in \omega} N_k$ y $f = \bigcup_{k \in \omega} f_k$. Por el teorema 3.43 se cumple que $N \models S$ y $f : N \rightarrow \omega$ cumple que si $N(\in)(u, v)$ entonces $f(u) < f(v)$, luego $N(\in)$ está bien fundada. Obviamente $N \in L[S]$. ■

Teorema 3.46 (Lévy-Shoenfield) *Sea $\phi(x, a)$ una fórmula Δ_0 del lenguaje de la teoría de conjuntos (metamatemático) cuyas variables libres sean a lo sumo las indicadas. Si $a \subset V_\omega$, entonces*

$$\forall x \phi(x, a) \leftrightarrow \forall x \in L[a] \phi(x, a).$$

DEMOSTRACIÓN: Sea \mathcal{L} el lenguaje formal que consta de un relator \in y de las constantes \bar{X}, \bar{a} y $\{\bar{x}\}_{x \in L_\omega}$. Podemos tomarlo $\mathcal{L} \in L$.

Añadimos a \mathcal{L} los relatores R_1, \dots, R_k necesarios para que existe una sentencia $\bigwedge \bigvee \phi'$ que cumpla el teorema 3.44 para la sentencia

$$\forall x \phi(x, \bar{a}) \wedge \bigwedge xy (\bigwedge u (u \in x \leftrightarrow u \in y) \rightarrow x = y) \wedge \bigwedge x (x \in \bar{X} \rightarrow x \in L_\omega).$$

Hay que entender que $x \in L_\omega$ representa la versión matemática de un equivalente sin descriptores de la correspondiente fórmula metamatemática.

Sea S el conjunto formado por las siguientes sentencias de \mathcal{L} (todas ellas de tipo $\bigwedge \bigvee$):

- a) ϕ' ,
- b) $\bar{x} \in \bar{X}$, para todo $x \in L_\omega$,
- c) $\bigwedge x (x \in \bar{y} \leftrightarrow x = \bar{y}_1 \vee \dots \vee x = \bar{y}_n)$, donde $y = \{y_1, \dots, y_n\} \in L_\omega$,
- d) $\bar{x} \in \bar{a}$, para todo $x \in a$,
- e) $\bar{x} \notin \bar{a}$, para todo $x \in L_\omega \setminus a$,
- f) $\bigwedge x (x \in \bar{a} \rightarrow x \in \bar{X})$.

Como \bar{a} puede reconstruirse a partir de S y viceversa, es fácil ver que $a \in L[S]$ y $S \in L[a]$, luego $L[S] = L[a]$.

Supongamos que $\bigvee x \phi(x, a)$. Sea λ un ordinal límite tal que $x, a \in V_\lambda$, con lo que $V_\lambda \models (\bigvee x \phi)[a]$. Interpretando las constantes de \mathcal{L} de forma natural y los relatores según el teorema 3.44 resulta que $V_\lambda \models S$. Por el teorema anterior existe un modelo N de \mathcal{L} tal que $N \in L[S] = L[a]$, N está bien fundado y $N \models S$. En particular N cumple el axioma de extensionalidad, luego la relación $N(\in)$ es extensional y bien fundada. Podemos considerar el colapso transitivo $N' \in L[a]$, que es un modelo isomorfo a N , luego $N' \models S$. La transitividad y las sentencias de S fuerzan que $N'(\bar{X}) = L_\omega$ y $N'(\bar{a}) = a$. Como además $N' \models \bigvee x \phi(x, \bar{a})$, vemos que $\bigvee x \in N' \phi(x, a)$ (aquí usamos que ϕ es absoluta), de donde $\bigvee x \in L[a] \phi(x, a)$. ■

Capítulo IV

Extensiones genéricas

La teoría de extensiones genéricas (más conocida como “forcing”) fue ideada por P. Cohen (en una versión más rudimentaria que la que aquí vamos a exponer) para demostrar la independencia de la hipótesis del continuo, pero sus aplicaciones van mucho más allá.

Observemos que un modelo en el que no se cumpla la hipótesis del continuo no puede cumplir el axioma de constructibilidad, pero en ZFC no es posible demostrar la existencia de modelos transitivos M de $ZFC + V \neq L$ que sean clases propias. La razón es que un modelo en tales condiciones debería cumplir $L \subsetneq M \subset V$, y si demostráramos la existencia de tal M habríamos probado en particular que $V \neq L$, y ya hemos visto que esto es imposible (salvo que ZFC sea contradictorio). Así pues, para construir modelos M en los que $V \neq L$, o en los que $2^{\aleph_0} = \aleph_2$, o en los que no se cumpla \Diamond , etc., debemos buscarlos de modo que sean conjuntos. En tal caso la negación del axioma de constructibilidad en el modelo sólo se traduce en que $L_{\Omega^M} \subsetneq M$, y eso no contradice al axioma de constructibilidad, pues nada impide que los elementos de M aparezcan en niveles de la jerarquía constructible correspondientes a ordinales que no estén en M y, por lo tanto, “parezcan” no constructibles en M .

La teoría de extensiones genéricas permite construir modelos así, pues su planteamiento general consiste en partir de un modelo transitivo M de ZFC y construir a partir de él otro modelo N de modo que $M \subset N$ (y, salvo casos triviales, $M \subsetneq N$), pero $\Omega^M = \Omega^N$, es decir, que añade conjuntos a M , pero no añade ningún ordinal. Así $L_{\Omega^N} = L_{\Omega^M} \subset M \subsetneq N$, luego resulta que los conjuntos constructibles ^{N} coinciden con los constructibles ^{M} , que no son todos los de N . Por lo tanto, todos los modelos construidos de este modo satisfacen $V \neq L$ y demuestran que el axioma de constructibilidad es indemostrable en ZFC.

Sucede que la extensión N construida a partir de un modelo M mediante la teoría de extensiones genéricas está íntimamente relacionada con el modelo base M , en el sentido de que, en muchos casos, M contiene toda la información necesaria para saber si una sentencia es verdadera o falsa en N . Más concretamente, podemos desarrollar un lenguaje que sólo involucra objetos de M con el

cual alguien que “viva” en M puede hablar de lo que sucede en N y en muchos casos llegar a conclusiones sobre si una sentencia dada tiene que ser verdadera o falsa en N , a pesar de que no puede “ver” los conjuntos de N que quedan fuera de su universo M .

Esto hace que la teoría de extensiones genéricas tenga una faceta sintáctica y otra semántica, y a la hora de exponerla son posibles distintos enfoques según a qué parte se le dé más peso. En principio es posible un enfoque puramente sintáctico (basado exclusivamente en el lenguaje que permite hablar de la extensión N , sin llegar a construirla en ningún momento), pero resulta extremadamente artificial. Lo más habitual es incidir en el aspecto semántico (la construcción de la extensión N) y reducir a lo indispensable el aspecto semántico (el hecho de que desde M se puede hablar de N), pero entonces tanto el proceso de la construcción de la extensión genérica como los resultados sintácticos necesarios aparecen como misteriosamente “mágicos”. Aquí trataremos de guardar el equilibrio entre ambos enfoques. Empezaremos con los aspectos sintácticos para mostrar lo que tienen de natural y motivar la construcción de la extensión genérica, pero pasaremos a la parte semántica en el punto en que continuar usando exclusivamente razonamientos sintácticos resultaría artificial.

4.1 Modelos booleanos

Según acabamos de explicar, la teoría de extensiones genéricas consiste en partir de un modelo M y construir a partir de él otro modelo N , de tal modo que desde M se puede hablar de N . En esta primera sección vamos a “meternos en la piel” de alguien que “viva” en M y así no vamos a hablar de modelos para nada, sino que vamos a desarrollar un lenguaje para hablar de un “universo trascendente” que queda más allá de la clase V de todos los conjuntos que conocemos. De momento podemos pensar que nuestro lenguaje nos permite hablar de unos “conjuntos ideales”, muchos de los cuales no son ninguno de los conjuntos que conocemos, pero que podremos convertir en “conjuntos reales” relativizando toda la teoría a un modelo M y probando que existe un modelo mayor N que se ajusta a la realidad descrita por nuestro lenguaje.

El lenguaje que vamos a considerar será el resultado de añadir al lenguaje de la teoría de conjuntos una clase propia de nuevas constantes, a las que llamaremos “nombres”, cada una de las cuales pretenderá nombrar a un “conjunto ideal” (aunque no podremos asegurar que nombres distintos hagan referencia necesariamente a conjuntos distintos). Razonando con este lenguaje podremos especular sobre los “conjuntos ideales” y en algunos casos podremos llegar a conclusiones sobre qué sentencias son verdaderas o falsas sobre ellos, aunque en otros casos no podremos concluir nada con certeza. La forma de plasmar esta incertidumbre será a través de un álgebra de Boole completa \mathbb{B} . Vamos a fijar un álgebra y veremos cómo asignar a cada sentencia ϕ de nuestro lenguaje (es decir, a toda fórmula del lenguaje de la teoría de conjuntos cuyas variables han sido reemplazadas por nombres) un “valor booleano” $\|\phi\|$, de forma que $\|\phi\| = \mathbb{1}$ significará que la sentencia ϕ es verdadera, $\|\phi\| = \mathbb{0}$ significará que es

falsa, mientras que un valor distinto para $\|\phi\|$ nos dejará en la duda (lo cual significará que es posible construir distintas extensiones de nuestro universo de modo que ϕ sea verdadera en unas y falsa en otras).

Esta incertidumbre será en la práctica menor de lo que podría pensarse, pues en muchos casos podremos probar que toda sentencia del lenguaje de la teoría de conjuntos (es decir, en la que no aparezcan nombres) tendrá necesariamente un valor booleano \emptyset o 1 , dependiendo únicamente del álgebra de Boole elegida.

El primer paso para desarrollar estas ideas es, fijada un álgebra de Boole completa \mathbb{B} , construir la clase de los \mathbb{B} -nombres. La idea subyacente es considerar que cada \mathbb{B} -nombre será una función característica generalizada. Dado un conjunto A , podemos tomar un α tal que $A \subset V_\alpha$, y entonces A queda completamente determinado por su función característica $\chi_A : V_\alpha \rightarrow 2$. La clase de los \mathbb{B} -nombres surge de “difuminar” esta idea cambiando sistemáticamente el 2 (que podemos ver como el álgebra de Boole trivial) por un álgebra completa arbitraria. Aunque no es exactamente la definición que vamos a adoptar, una primera aproximación sería considerar la sucesión transfinita siguiente:

$$V_0^\mathbb{B} = \emptyset, \quad V_{\alpha+1}^\mathbb{B} = V_\alpha^\mathbb{B} \cup \mathbb{B}^{V_\alpha^\mathbb{B}}, \quad V_\lambda^\mathbb{B} = \bigcup_{\delta < \lambda} V_\delta^\mathbb{B}, \quad V^\mathbb{B} = \bigcup_{\alpha \in \Omega} V_\alpha^\mathbb{B}.$$

La clase $V^\mathbb{B}$ de los \mathbb{B} -nombres, así definida, supone que cada \mathbb{B} -nombre σ es una “función característica generalizada” $\sigma : V_\alpha^\mathbb{B} \rightarrow \mathbb{B}$, de modo que si $\pi \in V_\alpha$ podemos definir $\|\pi \in \sigma\| = \sigma(\pi) \in \mathbb{B}$. Así, si $\sigma(\pi) = 1$, eso se interpreta como que el “conjunto ideal” nombrado por π pertenece sin duda al “conjunto ideal” nombrado por σ , si $\sigma(\pi) = \emptyset$ significa que el “conjunto ideal” nombrado por π no pertenece al “conjunto ideal” nombrado por σ , mientras que si $\sigma(\pi)$ es un valor de \mathbb{B} distinto de \emptyset o 1 , entonces no podemos decidir si se da o no la pertenencia (habrá posibles modelos que “realicen” los “conjuntos ideales” en los que π denote a un elemento del conjunto denotado por σ y otros en los que no).

El hecho de que no podamos asegurar si el conjunto denotado por un nombre pertenece o no al conjunto denotado por otro nombre se traduce inmediatamente en que no podemos asegurar si dos nombres σ y τ van a nombrar o no al mismo “conjunto ideal”, de modo que tenemos que definir un valor booleano $\|\sigma = \tau\|$ que no lleve a contradicciones con la relación $\|\pi \in \sigma\| = \sigma(\pi)$. Por otro lado, también tenemos que definir el valor de $\|\pi \in \sigma\|$ cuando $\sigma : V_\alpha^\mathbb{B} \rightarrow \mathbb{B}$ pero $\pi \notin V_\alpha^\mathbb{B}$, y no podemos decidir que en tal caso $\|\pi \in \sigma\| = \emptyset$, porque podría ocurrir que existiera un $\rho \in V_\alpha^\mathbb{B}$ tal que $\|\rho \in \sigma\| > \emptyset$ y por otro lado la coherencia nos obligara a definir $\|\rho \in \sigma\| > \emptyset$. En estas circunstancias $\|\pi \in \sigma\|$ tendría que tener necesariamente un valor no nulo.

Lo cierto es que sólo hay una forma de definir los valores booleanos $\|\sigma \in \tau\|$ y $\|\sigma = \tau\|$ coherente con la idea de que, cuando $\pi \in \mathcal{D}\sigma$, tiene que cumplirse $\|\pi \in \sigma\| = \sigma(\pi)$ (de modo que cada nombre pueda verse como una función característica “difuminada”), pero la construcción de estas funciones no es trivial. En la práctica se simplifica un poco si imponemos a los \mathbb{B} -nombres una condición de coherencia adicional a la que llamaremos “extensionalidad”, la cual

involucra a las funciones $\|\sigma \in \tau\|$ y $\|\sigma = \tau\|$, lo que nos lleva a definir estas funciones simultáneamente a los nombres:

Definición 4.1 Sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa. Definimos por recurrencia una sucesión creciente de conjuntos $\{V_\alpha^\mathbb{B}\}_{\alpha \in \Omega}$ y dos sucesiones $\{\|\sigma = \tau\|_\alpha\}_{\alpha \in \Omega}$, $\{\|\sigma \in \tau\|_\alpha\}_{\alpha \in \Omega}$ de funciones $V_\alpha^\mathbb{B} \times V_\alpha^\mathbb{B} \rightarrow \mathbb{B}$, de forma que si $\alpha < \beta$ entonces $\|\sigma = \tau\|_\beta$ y $\|\sigma \in \tau\|_\beta$ extiendan a $\|\sigma = \tau\|_\alpha$ y $\|\sigma \in \tau\|_\alpha$, respectivamente.

Partimos de $V_0^\mathbb{B} = \emptyset$, de modo que las dos funciones correspondientes son ambas \emptyset . Supuestos definidos $\{V_\delta^\mathbb{B}\}_{\delta < \lambda}$ de modo que la sucesión sea creciente y cada una de las funciones $\|\sigma = \tau\|_\delta$ y $\|\sigma \in \tau\|_\delta$ extienda a las anteriores, definimos

$$V_\lambda^\mathbb{B} = \bigcup_{\delta < \lambda} V_\delta^\mathbb{B},$$

y las funciones $\|\sigma = \tau\|_\lambda$ y $\|\sigma \in \tau\|_\lambda$ se definen como la única extensión común de las funciones correspondientes a cada nivel δ .

Por último, supongamos definido $V_\alpha^\mathbb{B}$ con sus funciones correspondientes. Definimos entonces $V_{\alpha+1}^\mathbb{B}$ como la unión de $V_\alpha^\mathbb{B}$ y el conjunto de todas las funciones $\sigma : V_\alpha^\mathbb{B} \rightarrow \mathbb{B}$ que sean *extensionales*, en el sentido de cumplir la propiedad siguiente:

$$\bigwedge \tau \pi \in V_\alpha^\mathbb{B} (\sigma(\tau) \wedge \|\tau = \pi\|_\alpha \leq \sigma(\pi)).$$

Para definir $\|\sigma = \tau\|_{\alpha+1}$ y $\|\sigma \in \tau\|_{\alpha+1}$ distinguimos seis casos:

- a) $\sigma \in V_\alpha^B$ y $\tau \in V_\alpha^B$. Entonces

$$\|\sigma = \tau\|_{\alpha+1} = \|\sigma = \tau\|_\alpha, \quad \|\sigma \in \tau\|_{\alpha+1} = \|\sigma \in \tau\|_\alpha.$$

Esto garantiza que las funciones $\|\sigma = \tau\|_{\alpha+1}$ y $\|\sigma \in \tau\|_{\alpha+1}$ extienden a las anteriores.

- b) $\sigma \in V_\alpha^\mathbb{B}$ y $\tau \notin V_\alpha^\mathbb{B}$.

1. $\|\sigma \in \tau\|_{\alpha+1} = \tau(\sigma)$.
2. $\|\sigma = \tau\|_{\alpha+1} = \|\tau = \sigma\|_{\alpha+1} =$

$$\bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}_\sigma} (\|\pi \in \sigma\|_\alpha \rightarrow \|\pi \in \tau\|_{\alpha+1}) \wedge \bigwedge_{\pi \in V_\alpha^\mathbb{B}} (\|\pi \in \tau\|_{\alpha+1} \rightarrow \|\pi \in \sigma\|_\alpha).$$

Notemos que $\|\pi \in \tau\|_{\alpha+1} = \tau(\pi)$ está definido en b1.

$$3. \|\tau \in \sigma\|_{\alpha+1} = \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}_\sigma} (\|\pi = \tau\|_{\alpha+1} \wedge \|\pi \in \sigma\|_\alpha).$$

Aquí $\|\pi = \tau\|_{\alpha+1}$ está definido en b2.

- c) $\sigma \notin V_\alpha^\mathbb{B}$ y $\tau \notin V_\alpha^\mathbb{B}$.

$$1. \|\sigma = \tau\|_{\alpha+1} = \bigwedge_{\pi \in V_\alpha^\mathbb{B}} (\|\pi \in \sigma\|_{\alpha+1} \leftrightarrow \|\pi \in \tau\|_{\alpha+1}).$$

$$2. \|\sigma \in \tau\|_{\alpha+1} = \bigvee_{\pi \in V_\alpha^\mathbb{B}} (\|\sigma = \pi\|_{\alpha+1} \wedge \|\pi \in \tau\|_{\alpha+1}).$$

Definimos la clase de los \mathbb{B} -nombres extensionales como

$$V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}} = \bigcup_{\alpha \in \Omega} V_{\alpha}^{\mathbb{B}}.$$

Sobre esta clase tenemos definidas las (únicas) funciones $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$ que extienden a las funciones $\|\sigma = \tau\|_{\alpha}$ y $\|\sigma \in \tau\|_{\alpha}$.

De este modo, las relaciones $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$ se definen recurrentemente una en función de la otra, pero ha quedado claro que en dicha definición recurrente respeta las condiciones del teorema general de recursión transfinita y, por consiguiente, es una definición válida en ZFC, en la que no hay ninguna circularidad que la invalide. Establecido esto, podemos enunciar las propiedades que hemos usado para definirlas eliminando ya los casos y los subíndices:

Teorema 4.2 *Sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa y $\sigma, \tau \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$. Entonces:*

- a) *Si $\pi, \tau \in \mathcal{D}\sigma$, entonces $\|\pi \in \sigma\| \wedge \|\pi = \tau\| \leq \|\tau \in \sigma\|$.*
- b)
$$\|\sigma = \tau\| = \bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi \in \sigma\| \rightarrow \|\pi \in \tau\|) \wedge \bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\tau} (\|\pi \in \tau\| \rightarrow \|\pi \in \sigma\|).$$
- c)
$$\|\tau \in \sigma\| = \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi = \tau\| \wedge \|\pi \in \sigma\|).$$

DEMOSTRACIÓN: La propiedad a) es una reformulación de la propiedad extensionalidad que hemos exigido a los \mathbb{B} -nombres. En efecto, lo que afirma la extensionalidad es que $\sigma(\pi) \wedge \|\pi = \tau\| \leq \sigma(\tau)$, pero por b1. de la definición anterior tenemos que $\sigma(\pi) = \|\pi \in \sigma\|$ y $\sigma(\tau) = \|\tau \in \sigma\|$.

b) es consecuencia inmediata de los casos c1. y b2. de la definición anterior.

Igualmente c) es consecuencia de los casos b3. y c2. pero hay que tener en cuenta que, en principio, estos casos no se aplican cuando $\tau \in \mathcal{D}\sigma$, pues en este caso la definición es $\|\tau \in \sigma\| = \sigma(\tau)$. Ahora bien, lo cierto es que c) también es válido en este caso, pues (por b) es claro que $\|\tau = \tau\| = \mathbf{1}$, luego

$$\|\tau \in \sigma\| = \|\tau = \tau\| \wedge \|\tau \in \sigma\| \leq \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi = \tau\| \wedge \|\pi \in \sigma\|) \leq \|\tau \in \sigma\|,$$

donde hemos usado a). ■

Nota El lector advertirá que las afirmaciones del teorema anterior son “naturales” en un sentido vago difícil de precisar. Por ejemplo, la propiedad b) “sugiere” que σ es igual a τ si todo elemento de σ está en τ y viceversa, pero en estos momentos no tenemos forma de enunciar esto con precisión. Esto cambiará en breve, en cuanto definamos el valor booleano $\|\phi\|$ de sentencias arbitrarias. ■

Definición 4.3 Si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa, llamaremos *rango* de un \mathbb{B} -nombre $\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ al ordinal $\text{rang } \sigma = \alpha$ tal que $\sigma : V_{\alpha}^{\mathbb{B}} \longrightarrow \mathbb{B}$.

Así, $\sigma \in \mathcal{D}\tau$ es equivalente a $\text{rang } \sigma < \text{rang } \tau$. Podemos usar inducción transfinita sobre el rango para demostrar resultados sobre las funciones que acabamos de definir. El teorema siguiente es un ejemplo. En él probamos en particular que la extensionalidad reflejada en la propiedad a) del teorema anterior es válida en general, sin suponer que π y τ estén en el dominio de σ :

Teorema 4.4 Sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa y $\rho, \sigma, \tau \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$. Entonces:

- a) $\|\rho = \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\rho = \tau\|,$
- b) $\|\rho = \sigma\| \wedge \|\sigma \in \tau\| \leq \|\rho \in \tau\|,$
- c) $\|\rho \in \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\rho \in \tau\|.$

DEMOSTRACIÓN: Consideramos el buen orden canónico en $\Omega \times \Omega \times \Omega$. Si el teorema es falso, podemos tomar una terna de nombres (ρ, σ, τ) que incumpla cualquiera de los apartados tal que la terna $(\text{rang}(\rho), \text{rang}(\sigma), \text{rang}(\tau))$ sea mínima. Alternativamente, basta probar los tres apartados tomando como hipótesis de inducción que los cumplen todas las ternas de nombres cuya terna de rangos es menor que $(\text{rang}(\rho), \text{rang}(\sigma), \text{rang}(\tau))$.

a) Tomemos $\pi \in \mathcal{D}\rho$. Por hipótesis de inducción

$$\|\pi \in \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\pi \in \tau\|.$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} (\|\pi \in \rho\|' \vee \|\pi \in \sigma\|) \wedge \|\sigma = \tau\| &= (\|\pi \in \rho\|' \vee \|\sigma = \tau\|) \wedge (\|\pi \in \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\|) \\ &\leq (\|\pi \in \rho\|' \vee \|\sigma = \tau\|) \wedge \|\pi \in \tau\| \leq \|\pi \in \rho\|' \vee \|\pi \in \tau\|. \end{aligned}$$

Equivalentemente,

$$(\|\pi \in \rho\| \rightarrow \|\pi \in \sigma\|) \wedge \|\sigma = \tau\| \leq (\|\pi \in \rho\| \rightarrow \|\pi \in \tau\|).$$

Tomando ínfimos:

$$\bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\rho} (\|\pi \in \rho\| \rightarrow \|\pi \in \sigma\|) \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\rho} (\|\pi \in \rho\| \rightarrow \|\pi \in \tau\|).$$

Análogamente probamos que

$$\bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi \in \sigma\| \rightarrow \|\pi \in \rho\|) \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi \in \tau\| \rightarrow \|\pi \in \rho\|).$$

Combinando estas dos desigualdades y aplicando 4.2 resulta:

$$\|\rho = \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\rho = \tau\|.$$

b) Tomamos ahora $\pi \in \mathcal{D}\tau$. Por hipótesis de inducción

$$\|\rho = \sigma\| \wedge \|\sigma = \pi\| \leq \|\rho = \pi\|.$$

Por lo tanto,

$$\|\rho = \sigma\| \wedge \|\sigma = \pi\| \wedge \|\pi \in \tau\| \leq \|\rho = \pi\| \wedge \|\pi \in \tau\|,$$

luego

$$\|\rho = \sigma\| \wedge \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\tau} (\|\sigma = \pi\| \wedge \|\pi \in \tau\|) \leq \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\tau} (\|\rho = \pi\| \wedge \|\pi \in \tau\|)$$

y por 4.2 obtenemos $\|\rho = \sigma\| \wedge \|\sigma \in \tau\| \leq \|\rho \in \tau\|$.

c) Tomamos $\pi \in \mathcal{D}\sigma$. De la definición de $\|\sigma = \tau\|$ deducimos que

$$\|\pi \in \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\pi \in \sigma\| \wedge (\|\pi \in \sigma\| \rightarrow \|\pi \in \tau\|) \leq \|\pi \in \tau\|,$$

luego

$$\|\rho = \pi\| \wedge \|\pi \in \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\rho = \pi\| \wedge \|\pi \in \tau\| \leq \|\rho \in \tau\|,$$

donde hemos usado la hipótesis de inducción. De aquí:

$$\bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\rho = \pi\| \wedge \|\pi \in \sigma\|) \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\rho \in \tau\|,$$

y por 4.2 concluimos $\|\rho \in \sigma\| \wedge \|\sigma = \tau\| \leq \|\rho \in \tau\|$. ■

Podríamos definir un “lenguaje de la teoría de extensiones”, tal y como hemos sugerido en la introducción, pero en la práctica es más sencillo considerar fórmulas metamatemáticas $\phi(x_1, \dots, x_n)$ del lenguaje de la teoría de conjuntos y definir para cada una de ellas un término $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|$ cuyas variables libres sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ más las necesarias para representar todos los elementos que definen un álgebra de Boole: $\mathbb{B}, \wedge, \vee, '$. Concretamente:

Definición 4.5 Para cada fórmula (metamatemática) sin descriptores definimos inductivamente su *valor booleano* del modo siguiente:

- a) $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$ son los términos ya definidos,
- b) $\|\neg\phi\| \equiv \|\phi'\|$,
- c) $\|\phi \rightarrow \psi\| \equiv \|\phi\| \rightarrow \|\psi\|$,
- d) $\|\Lambda x \phi\| \equiv \bigwedge_{\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} \|\phi(\sigma)\|$.

Por ejemplo, en el apartado c) hay que entender que el miembro derecho es una abreviatura por $\|\phi'\| \vee \|\psi\|$, donde ' $\|$ ' y \vee son variables del lenguaje de la teoría de conjuntos, de modo que una simple inducción sobre la longitud de ϕ demuestra trivialmente el teorema siguiente en ZF:

Si $(\mathbb{B}, \wedge, \vee, ')$ es un álgebra de Boole completa y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, entonces $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\| \in \mathbb{B}$.

Notemos que, formalmente, el teorema empieza por

$\wedge \mathbb{B} \wedge \vee' \sigma_1 \cdots \sigma_n ((\mathbb{B}, \wedge, \vee, '))$ es un álgebra de Boole completa $\wedge \cdots$,

de modo que, por ejemplo, \wedge es una variable que, por hipótesis representa una función $\wedge: \mathbb{B} \times \mathbb{B} \rightarrow \mathbb{B}$, etc.

Además, utilizando las propiedades elementales de las álgebras de Boole, se demuestran trivialmente las relaciones siguientes:

- e) $\|\phi \vee \psi\| = \|\phi\| \vee \|\psi\|,$
- f) $\|\phi \wedge \psi\| = \|\phi\| \wedge \|\psi\|,$
- g) $\|\phi \leftrightarrow \psi\| = \|\phi\| \leftrightarrow \|\psi\|,$
- h) $\|\forall x \phi\| = \bigvee_{\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} \|\phi(\sigma)\|.$

Notemos que en los casos d) y h) no importa que $V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ sea una clase propia, pues, por ejemplo, d) equivale a que

$$\|\lambda x \phi\| = \bigwedge \{p \in \mathbb{B} \mid \forall \sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}} \ p = \|\phi(\sigma)\|\},$$

que es el ínfimo de un cierto subconjunto de \mathbb{B} .

Ahora ya podemos precisar en qué sentido son “razonables” los resultados que estamos obteniendo. Por ejemplo, el apartado a) del teorema 4.4 puede reformularse ahora como que¹

$$\|\rho = \sigma \wedge \sigma = \tau \rightarrow \rho = \tau\| = \mathbf{1},$$

que expresa que un teorema lógico sobre el igualador es indiscutiblemente verdadero. Más en general, el teorema siguiente expresa que el igualador se comporta razonablemente:

Teorema 4.6 *Dada una fórmula metamatemática² $\phi(x, x_1, \dots, x_n)$, si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa y $\pi, \pi', \sigma_1, \dots, \sigma_n \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, entonces*

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\| \leq \|\phi(\pi', \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|.$$

DEMOSTRACIÓN: Basta probar que

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi', \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|.$$

Razonamos por inducción sobre ϕ . Si ϕ es atómica tenemos los casos

$$\pi \in \sigma, \quad \sigma \in \pi, \quad \pi = \sigma, \quad \pi = \pi, \quad \pi \in \pi,$$

y en todos ellos la conclusión se sigue aplicando el teorema anterior. Por ejemplo, para el primero tenemos

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\pi \in \sigma\| \leq \|\pi = \pi'\| \wedge \|\pi' \in \sigma\|,$$

e igualmente la desigualdad contraria. Para el último aplicamos dos veces el teorema:

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\pi \in \pi\| \leq \|\pi = \pi'\| \wedge \|\pi' \in \pi\| \leq \|\pi = \pi'\| \wedge \|\pi' \in \pi'\|.$$

¹Recordemos que en un álgebra de Boole $p \leq q$ equivale a $p \rightarrow q = \mathbf{1}$.

²En estos momentos debemos suponer que ϕ no tiene descriptores, pues sólo hemos definido $\|\phi\|$ en ese caso, pero no incluimos la restricción en el enunciado porque en cuanto extendamos la definición a fórmulas con descriptores todos los resultados serán trivialmente válidos para fórmulas cualesquiera.

Supuesto cierto para $\phi(\pi)$ (por brevedad no explicitaremos los nombres $\sigma_1, \dots, \sigma_n$), tenemos que

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi)\| = \|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi')\|,$$

y esto implica³

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi)\|' = \|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi')\|',$$

que es lo mismo que

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\neg\phi(\pi)\| = \|\pi = \pi'\| \wedge \|\neg\phi(\pi')\|.$$

Si vale para ϕ y ψ , tenemos que

$$\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi) \rightarrow \psi(\pi)\| = (\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi)\|') \vee (\|\pi = \pi'\| \wedge \|\psi(\pi)\|).$$

Usando la hipótesis de inducción y el caso ya probado para el negador obtenemos que

$$\begin{aligned} \|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi) \rightarrow \psi(\pi)\| &= (\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi')\|') \vee (\|\pi = \pi'\| \wedge \|\psi(\pi')\|) \\ &= \|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\pi')\|. \end{aligned}$$

Si vale para ϕ , entonces

$$\begin{aligned} \|\pi = \pi'\| \wedge \|\bigwedge x \phi(x, \pi)\| &= \|\pi = \pi'\| \wedge \bigwedge_{\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} \|\phi(\sigma, \pi)\| = \\ \bigwedge_{\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} (\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\sigma, \pi)\|) &= \bigwedge_{\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} (\|\pi = \pi'\| \wedge \|\phi(\sigma, \pi')\|) = \\ \|\pi = \pi'\| \wedge \bigwedge_{\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} \|\phi(\sigma, \pi')\| &= \|\pi = \pi'\| \wedge \|\bigwedge x \phi(x, \pi')\|. \end{aligned}$$

■

Como aplicación podemos simplificar el cálculo de los valores booleanos de los cuantificadores acotados:

Teorema 4.7 *Para toda fórmula $\phi(x, x_1, \dots, x_n)$, si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa y $\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, entonces*

$$\|\bigwedge x \in \sigma \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} \|\pi \in \sigma \rightarrow \phi(\pi, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|,$$

$$\|\bigvee x \in \sigma \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} \|\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|.$$

³Lo más sencillo es usar que toda álgebra de Boole es isomorfa a un álgebra de conjuntos y tener en cuenta que, si A, B, C son subconjuntos de X , es obvio que $A \cap B = A \cap C$ implica $A \cap (X \setminus B) = A \cap (X \setminus C)$, por lo que la relación vale en toda álgebra de Boole. Naturalmente, también puede probarse directamente a partir de los axiomas de álgebra de Boole.

DEMOSTRACIÓN: Por definición,

$$\|\forall x \in \sigma \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \bigvee_{\pi \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} \|\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|.$$

Tomamos $\pi \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ y observamos que, por el teorema anterior,

$$\begin{aligned} \|\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi)\| &= \|\pi \in \sigma\| \wedge \|\phi(\pi)\| = \bigvee_{\pi' \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi' = \pi\| \wedge \|\pi' \in \sigma\| \wedge \|\phi(\pi')\|) \\ &\leq \bigvee_{\pi' \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi' \in \sigma\| \wedge \|\phi(\pi')\|), \end{aligned}$$

luego, tomando el supremo,

$$\|\forall x \in \sigma \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\| \leq \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi \in \sigma\| \wedge \|\phi(\pi)\|),$$

y la otra desigualdad es inmediata. Ahora aplicamos esto a $\neg\phi$, con lo que

$$\|\neg\bigwedge x \neg(x \in \sigma \wedge \neg\phi)\| = \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} \|\pi \in \sigma \wedge \neg\phi\|.$$

Negando ambos miembros obtenemos

$$\|\bigwedge x \neg(x \in \sigma \wedge \neg\phi)\| = \bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} \|\pi \in \sigma \rightarrow \phi\|.$$

Desarrollando el primer miembro queda

$$\begin{aligned} \|\bigwedge x \neg(x \in \sigma \wedge \neg\phi)\| &= \bigwedge_{\pi \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} \|\pi \in \sigma \wedge \neg\phi\|' \\ &= \bigwedge_{\pi \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}} \|\pi \in \sigma \rightarrow \phi\| = \|\bigwedge x \in \sigma \phi\|. \end{aligned}$$

Por ejemplo, usando este teorema es inmediato que el apartado b) del teorema 4.2 equivale a

$$\|\sigma = \tau \leftrightarrow \bigwedge u \in \sigma \, xu \in \tau \wedge \bigwedge u \in \tau \, u \in \sigma\| = \mathbf{1}$$

y, como esto vale para todo par de \mathbb{B} -nombres, de ahí se sigue inmediatamente

$$\|\bigwedge xy (x = y \leftrightarrow \bigwedge u \in x \, u \in y \wedge \bigwedge u \in y \, u \in x)\| = \mathbf{1},$$

y esta fórmula es equivalente al axioma de extensionalidad.⁴ Mediante este tipo de razonamientos puramente sintáticos podríamos terminar demostrando el teorema siguiente (pero pospondremos la prueba hasta la página 147):

Teorema 4.8 *Si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa y ϕ es una sentencia demostrable en ZFC, entonces $\|\phi\| = \mathbf{1}$.*

⁴No es difícil demostrar que $\|\bigwedge xy (\bigwedge u (u \in x \leftrightarrow u \in y) \rightarrow x = y)\| = \mathbf{1}$, que sería la forma usual del axioma de extensionalidad, pero no es inmediato. Notemos que no tenemos demostrado que si dos fórmulas ϕ y ψ son lógicamente equivalentes entonces $\|\phi\| = \|\psi\|$.

Notemos que no basta demostrar que los axiomas de ZFC tienen valor booleano $\mathbf{1}$ respecto de cualquier álgebra, sino que también hay que probar que las consecuencias lógicas de fórmulas con valor booleano $\mathbf{1}$ tienen también valor booleano $\mathbf{1}$, y las técnicas necesarias para llegar a estos resultados resultan artificiales porque “ocultan” la parte semántica de los argumentos, que presentaremos en la sección siguiente.

Si demostráramos sintácticamente el teorema anterior, una forma de probar, por ejemplo, que $2^{\aleph_0} = \aleph_2$ es consistente con ZFC es elegir adecuadamente un álgebra de Boole completa \mathbb{B} y demostrar que $\|2^{\aleph_0} = \aleph_2\| = \mathbf{1}$. La conclusión se obtiene de observar que si en ZFC pudiera probarse que $2^{\aleph_0} \neq \aleph_2$, por el teorema anterior en ZFC podríamos probar, para cualquier álgebra de Boole completa, $\|2^{\aleph_0} = \aleph_2\| = \emptyset$, y tendríamos una contradicción en ZFC, pues para el álgebra escogida \mathbb{B} también sabemos probar $\|2^{\aleph_0} = \aleph_2\| = \mathbf{1}$.

Aquí estamos considerando valores booleanos de sentencias con descriptores. Terminamos esta sección explicando cómo definirlos. Las mismas técnicas con las que probaremos el teorema 4.8 permiten probar esta variante (daremos la prueba en la pág. 137):

Teorema 4.9 *Si $\phi(x_1, \dots, x_n)$ y $\psi(x_1, \dots, x_n)$ son fórmulas sin descriptores equivalentes en ZFC, en el sentido de que*

$$\vdash_{\text{ZFC}} \bigwedge x_1 \cdots x_n (\phi \leftrightarrow \psi),$$

en ZFC se prueba que si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, entonces $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \|\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|$.

Por lo tanto, si ϕ tiene descriptores y ψ es una fórmula sin descriptores equivalente en ZFC, podemos definir $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \|\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|$ sin que importe la elección de ψ , pues el teorema anterior implica que el valor booleano será el mismo en cualquier caso. Con esta definición es inmediato que todos los resultados que hemos demostrado para fórmulas sin descriptores se generalizan trivialmente a fórmulas arbitrarias.

4.2 Extensiones con álgebras de Boole

Presentamos ahora la vertiente semántica de la teoría sintáctica expuesta en la sección anterior. Para ello consideraremos un modelo transitivo M de ZF (en principio admitimos que sea un conjunto o una clase propia) y $\mathbb{B} \in M$ un álgebra de Boole completa M . Vamos a construir un modelo N en el que los \mathbb{B} -nombres de $M_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ tengan una interpretación.

Notemos ante todo que las fórmulas $\sigma \in V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$ son absolutas para modelos transitivos de ZF. En realidad esto hay que entenderlo con precaución, porque un álgebra de Boole completa M es un álgebra de Boole, pero no necesariamente completa, por lo que, en sentido estricto, tenemos definidos $M_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, $\|\sigma = \tau\|^M$ y $\|\sigma \in \tau\|^M$, pero no $V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$. Ahora bien,

es claro que la definición 4.1 es válida (sin relativizar) para ordinales $\alpha \in \Omega^M$, puesto que sólo requiere calcular supremos e ínfimos de subconjuntos de \mathbb{B} que están en M , por lo que su existencia está garantizada aunque el álgebra no sea completa. Con esta salvedad, es fácil probar por inducción sobre $\alpha \in \Omega^M$ que

$$(V_\alpha^\mathbb{B})^M = V_\alpha^\mathbb{B}, \quad \|\sigma = \tau\|_\alpha^M = \|\sigma = \tau\|_\alpha, \quad \|\sigma \in \tau\|_\alpha^M = \|\sigma \in \tau\|_\alpha.$$

En definitiva, tenemos definida la clase $M_{\text{ext}}^\mathbb{B} = V_{\Omega^M}^\mathbb{B} \subset M$ y sobre cada par de \mathbb{B} -nombres de $M_{\text{ext}}^\mathbb{B}$ están definidas las funciones $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$, que se calculan exactamente igual que si \mathbb{B} fuera un álgebra completa y no meramente completa ^{M} (pues los supremos o ínfimos necesarios existen igualmente).

En cambio, para una fórmula arbitraria ϕ , podemos hablar del valor booleano $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M$, pero no de $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|$, pues para calcular $\|\wedge x\psi\|^M$ hay que tomar un ínfimo sobre $M_{\text{ext}}^\mathbb{B}$ y éste no tiene por qué ser el mismo que si lo calculamos sobre $V_{\text{ext}}^\mathbb{B}$ (hasta el punto de que el primero existe por la completitud ^{M} de \mathbb{B} y el segundo ni siquiera tiene por qué estar definido).

La clave para construir el modelo N es que tenemos que decidir cuándo los objetos denotados por dos nombres σ y $\tau \in M^\mathbb{B}$ son iguales o se pertenecen uno al otro. Esto viene forzado si $\|\sigma = \tau\|$ o $\|\sigma \in \tau\|$ toman valores \emptyset o 1 , pero si toman valores intermedios tenemos que decidir de algún modo si nos decantamos por el sí o por el no. Esto lo haremos fijando un ultrafiltro G en \mathbb{B} . Construiremos el modelo N de modo que, en general, los objetos de N denotados por unos nombres $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ cumplan ϕ^N si y sólo si $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G$.

En otras palabras, si pensamos en los elementos de \mathbb{B} como valores de verdad, de forma que una fórmula tal que $\|\phi\| \neq \emptyset, 1$ es “dudosa”, el efecto del ultrafiltro G es “disipar la duda”, de modo que si $\|\phi\| \in G$ entonces ϕ será verdadera en el modelo N y en caso contrario será falsa. Esta idea basta para definir N :

Definición 4.10 Sea M un modelo transitivo de ZF, sea $\mathbb{B} \in M$ un álgebra de Boole completa ^{M} y G un ultrafiltro en \mathbb{B} . Definimos una función $M_{\text{ext}}^\mathbb{B} \longrightarrow V$, que representaremos mediante $\sigma \mapsto \sigma_G$, mediante:

$$\sigma_B = \{\tau_G \mid \tau \in \mathcal{D}\sigma \wedge \sigma(\tau) \in G\}.$$

Se trata de una definición por recurrencia sobre el rango de un \mathbb{B} -nombre, es decir, definimos σ_G supuesto definido τ_G para todo \mathbb{B} -nombre τ que cumpla $\text{rang}(\tau) < \text{rang}(\sigma)$. Definimos

$$M[G] = \{\sigma_G \mid \sigma \in M_{\text{ext}}^\mathbb{B}\}.$$

Recordemos que $\sigma(\tau) = \|\tau \in \sigma\|$, luego lo que estamos estableciendo es que $\tau_G \in \sigma_G$ si y sólo si $\|\tau \in \sigma\| \in G$, es decir, si el valor de verdad de $\tau \in \sigma$ es “suficientemente verdadero”, en el sentido marcado por el ultrafiltro G .

Veremos que $N = M[G]$ es la extensión de M que necesitamos, pero para que esto sea así no basta con que G sea cualquier ultrafiltro en \mathbb{B} . En efecto, de la propia definición de ultrafiltro se sigue fácilmente que “pertener a G ” es identifiable con “ser verdadero” en todo lo tocante al cálculo proposicional, en el sentido de que si $p, q \in \mathbb{B}$, se cumple

- a) $p \in G \leftrightarrow p' \notin G,$
- b) $p \wedge q \in G \leftrightarrow p \in G \wedge q \in G,$
- c) $p \vee q \in G \leftrightarrow p \in G \vee q \in G,$
- d) $p \rightarrow q \in G \leftrightarrow p \notin G \vee q \in G,$
- e) $p \leftrightarrow q \in G \leftrightarrow (p \in G \leftrightarrow q \in G).$

En cambio, para que un ultrafiltro G se comporte adecuadamente con los supremos e ínfimos que valoran los cuantificadores necesitamos exigir una propiedad adicional:

Definición 4.11 Diremos que un ultrafiltro G es \mathbb{B} -genérico⁵ sobre M si

$$\bigwedge X \in M(X \subset G \rightarrow \bigwedge X \in G).$$

Notemos que el recíproco es trivial: si $\bigwedge X \in G$, entonces $X \subset G$, por la definición de filtro. Similarmente, un ultrafiltro genérico cumple

$$\bigwedge X \in M(X \cap G \neq \emptyset \leftrightarrow \bigvee X \in G).$$

En efecto, si $X \cap G = \emptyset$ entonces $X' \subset G$, luego $\bigwedge X' \in G$, luego $(\bigvee X)' \in G$, luego $\bigvee X \notin G$ y si $p \in X \cap G$ entonces $p \leq \bigvee X$, luego $\bigvee X \in G$.

Equivalentemente: $\bigwedge X$ es “verdadero” si y sólo si todos los elementos de X son “verdaderos”, mientras que $\bigvee X$ es “verdadero” si y sólo si algún elemento de X es “verdadero”. Ésta es la conexión que necesitamos entre el ultrafiltro y los cuantificadores para que la construcción de N sea viable.

Los modelos $M[G]$ construidos a partir de ultrafiltros genéricos se llamarán *extensiones genéricas* de M . De momento ni siquiera es evidente que sean extensiones, es decir, que $M \subset M[G]$, pero no vamos a ocuparnos de ello, como tampoco nos ocuparemos de momento del problema de existencia de ultrafiltros genéricos en un álgebra de Boole completa.

Lo que vamos a ver a continuación es que $M[G]$ proporciona una interpretación razonable para los \mathbb{B} -nombres de $M_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$. El primer paso es probar el teorema siguiente:

Teorema 4.12 Sea M un modelo transitivo de ZF, sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa^M, sean $\sigma, \tau \in M_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ y sea G un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M . Entonces

$$\|\sigma = \tau\| \in G \text{ syss } \sigma_G = \tau_G, \quad \|\sigma \in \tau\| \in G \text{ syss } \sigma_G \in \tau_G.$$

DEMOSTRACIÓN: Por inducción sobre el mínimo ordinal β para el que se cumpla que $\sigma, \tau \in M_{\beta}^{\mathbb{B}}$. Necesariamente $\beta = \alpha + 1$. Distinguimos los seis casos que hemos considerado en la definición 4.1, aunque el caso a) no puede darse.

⁵En qué sentido es “genérico” un ultrafiltro genérico se entenderá más adelante.

b1. Si $\|\sigma \in \tau\| \in G$, entonces $\tau(\sigma) \in G$, luego claramente $\sigma_G \in \tau_G$.

Si $\sigma_G \in \tau_G$, entonces $\sigma_G = \pi_G$, con $\pi \in \mathcal{D}\tau$ y $\tau(\pi) \in G$. Por hipótesis de inducción $\|\sigma = \pi\| \in G$ y por consiguiente

$$\|\sigma = \pi\| \wedge \tau(\pi) \leq \tau(\sigma) = \|\sigma \in \tau\| \in G,$$

b2. Si $\|\sigma = \tau\| \in G$ y $x \in \sigma_G$, entonces $x = \pi_G$, para un $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ y $\sigma(\pi) \in G$. Por lo tanto $\|\pi \in \sigma\| \in G$. Por definición de $\|\sigma = \tau\|$, tenemos que $\|\pi \in \sigma\| \rightarrow \|\pi \in \tau\| \in G$, luego $\|\pi \in \tau\| \in G$. Por el caso anterior, esto implica que $x = \pi_G \in \tau_G$, luego $\sigma_G \subset \tau_G$. Igualmente se prueba la otra inclusión, con lo que $\sigma_G = \tau_G$.

Recíprocamente, si $\sigma_G = \tau_G$, vamos a probar que, para todo $\pi \in \mathcal{D}\sigma$, se cumple $\|\pi \in \sigma\| \rightarrow \|\pi \in \tau\| \in G$, para lo cual suponemos que $\|\pi \in \sigma\| \in G$ y hemos de probar que $\|\pi \in \tau\| \in G$.

Por el caso anterior $\pi_G \in \sigma_G = \tau_G$, luego, de nuevo por el caso anterior, $\|\pi \in \tau\| \in G$.

Como G es un ultrafiltro genérico y el conjunto de las condiciones de la forma $\|\pi \in \sigma\| \rightarrow \|\pi \in \tau\|$, con $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ está contenido en G , concluimos que

$$\bigwedge_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi \in \sigma\| \rightarrow \|\pi \in \tau\|) \in G.$$

Similarmente se prueba que

$$\bigwedge_{\pi \in V_\alpha^B} (\|\pi \in \tau\| \rightarrow \|\pi \in \sigma\|) \in G,$$

con lo que $\|\sigma = \tau\| \in G$.

b3. Tenemos que $\|\tau \in \sigma\| = \bigvee_{\pi \in \mathcal{D}\sigma} (\|\pi = \tau\| \wedge \|\pi \in \sigma\|)$. Como G es un ultrafiltro genérico se cumple que $\|\tau \in \sigma\| \in G$ si y sólo si existe $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ tal que $\|\pi = \tau\| \wedge \|\pi \in \sigma\| \in G$. Por el caso anterior y por la hipótesis de inducción, esto equivale $\tau_G = \pi_G \in \sigma_G$.

c1. Tenemos que $\|\sigma = \tau\| = \bigwedge_{\pi \in V_\alpha^B} (\|\pi \in \sigma\| \leftrightarrow \|\pi \in \tau\|)$, luego $\|\sigma = \tau\| \in G$ si y sólo si para todo $\pi \in V_\alpha^B$ se cumple que $\|\pi \in \sigma\| \in G$ si y sólo si $\|\pi \in \tau\| \in G$. Por b3. esto equivale a que, para todo $\pi \in V_\alpha^B$, se cumple $\pi_G \in \sigma_G$ si y sólo si $\pi_G \in \tau_G$, y es claro que esto equivale a $\sigma_G = \tau_G$.

c2. Tenemos que $\|\sigma \in \tau\| = \bigvee_{\pi \in V_\alpha^B} (\|\sigma = \pi\| \wedge \|\pi \in \tau\|)$, luego $\|\sigma \in \tau\| \in G$ si y sólo si existe un $\pi \in V_\alpha^B$ tal que $\|\sigma = \pi\| \in G$ y $\|\pi \in \tau\| \in G$. Por los casos precedentes esto equivale a que existe $\pi \in V_\alpha^B$ tal que $\sigma_G = \pi_G \in \tau_G$, y esto equivale claramente a que $\sigma_G \in \tau_G$. ■

Y a partir de aquí es fácil generalizar el teorema para fórmulas cualesquiera:

Teorema 4.13 (Teorema fundamental de la teoría de extensiones) *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula con a lo sumo las variables libres indicadas.⁶ Sea M un modelo transitivo de ZF, sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa M , sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^\mathbb{B}$ y sea G un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M . Entonces*

$$\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G.$$

DEMOSTRACIÓN: Por inducción sobre la longitud de ϕ . Para las fórmulas atómicas $x = y$ y $x \in y$ ya lo tenemos probado. Si es cierto para ϕ , entonces

$$\begin{aligned} (\neg\phi)^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) &\leftrightarrow \neg\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \notin G \\ &\leftrightarrow (\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|')^M \in G \leftrightarrow \|\neg\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G. \end{aligned}$$

Si el resultado vale para ϕ y para ψ , entonces

$$\begin{aligned} (\phi \rightarrow \psi)^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) &\leftrightarrow \neg\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \vee \psi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \\ &\leftrightarrow \|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \notin G \vee \|\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G \leftrightarrow \\ &\quad \|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \rightarrow \|\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G \leftrightarrow \|(\phi \rightarrow \psi)(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G. \end{aligned}$$

Supongamos finalmente que el resultado vale para $\phi(x, x_1, \dots, x_n)$. Entonces

$$\begin{aligned} &(\bigwedge x \phi(x, \sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}))^{M[G]} \leftrightarrow \bigwedge x \in M[G] \phi^{M[G]}(x, \sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \\ &\leftrightarrow \bigwedge \sigma \in M_{\text{ext}}^\mathbb{B} \phi^{M[G]}(\sigma_G, \sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \bigwedge \sigma \in M_{\text{ext}}^\mathbb{B} \|\phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G \\ &\leftrightarrow \bigwedge_{\sigma \in M_{\text{ext}}^\mathbb{B}} \|\phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G \leftrightarrow \|\bigwedge x \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \in G. \end{aligned} \quad \blacksquare$$

Así pues, alguien que “viva” en M puede reducir cualquier problema sobre si una determinada afirmación ϕ es verdadera o falsa en $M[G]$ al problema de si un elemento de \mathbb{B} que puede calcular (el valor booleano $\|\phi\|^M$) está o no en un cierto ultrafiltro genérico. Si concluye que $\|\phi\|^M = \mathbf{1}$, entonces puede asegurar que ϕ será verdadera en cualquier extensión genérica construida a partir del álgebra \mathbb{B} , independientemente del ultrafiltro empleado para construirla.

Por ejemplo, si tuviéramos probado el teorema 4.8, ahora podríamos concluir que las extensiones genéricas son modelos de ZFC. Sin embargo, seguiremos el camino inverso: demostraremos que las extensiones genéricas son modelos de ZFC para deducir de ahí 4.8.

El hecho de que una determinada fórmula pueda tener un valor booleano distinto de $\mathbb{0}$, $\mathbf{1}$ se interpreta como que puede ser verdadera o falsa en una extensión genérica en función del ultrafiltro utilizado para construirla. Sin embargo, según ya hemos indicado, veremos que en si \mathbb{B} cumple una hipótesis frecuente, podrá probarse que toda sentencia (en la que no aparezcan nombres) tiene que tener necesariamente valor booleano $\mathbb{0}$ o $\mathbf{1}$.

⁶En principio sólo podemos demostrar el teorema para fórmulas sin descriptores, pero, cuando tengamos probado 4.9 y podamos asignar valores booleanos a fórmulas arbitrarias según la observación posterior, este teorema valdrá trivialmente para fórmulas con descriptores.

En este punto conviene interrumpir nuestro avance en la teoría para pasar a un contexto más general. Las álgebras de Boole completas proporcionan el contexto más adecuado para definir el valor booleano $\|\phi\|$ de una fórmula y llegar al teorema fundamental, pero sucede que en la práctica son prescindibles. En las secciones siguientes veremos que podemos definir extensiones genéricas partiendo de conjuntos preordenados cualesquiera. En [TC 10.22] se prueba que todo conjunto preordenado \mathbb{P} puede sumergirse densamente en un álgebra de Boole completa \mathbb{B} , y vamos a ver que las extensiones genéricas determinadas por \mathbb{B} pueden construirse directamente a partir de \mathbb{P} , y la posibilidad de trabajar con conjuntos preordenados arbitrarios proporciona un enfoque alternativo de la teoría que resulta imprescindible para comprenderla adecuadamente.

Por otra parte, podríamos haber desarrollado toda la teoría sin mencionar en ningún momento las álgebras de Boole, pero entonces la demostración del teorema fundamental se vuelve mucho más técnica y artificial y es esa parte la que termina desfigurada.

4.3 Conjuntos preordenados

En las secciones precedentes hemos visto cómo un álgebra de Boole completa puede tomarse como “guía” para construir un modelo de ZFC (aunque todavía no hemos demostrado que realmente obtenemos un modelo) y sucede que, según qué álgebra elijamos, podemos conseguir modelos en los que se cumpla $2^{\aleph_0} = \aleph_2$, o $2^{\aleph_0} = \aleph_{\omega+1}$ o donde falle \Diamond , etc., pero nada de lo que hemos visto hasta ahora nos orienta sobre cómo conviene elegir un álgebra \mathbb{B} para que en las extensiones construidas con ella cumplan una u otra propiedad. Ahora podemos empezar a enfrentarnos a este problema.

Por considerar el caso más simple, vamos a ver cómo partir de un modelo transitivo M de ZFC (en el que podemos suponer, si queremos, que se cumple $V = L$) y construir otro modelo N de ZFC en el que exista un conjunto $a \subset \omega$ no constructible ^{N} . Así demostrarímos que en ZFC no puede probarse que todo subconjunto de ω sea constructible.

Trataremos de definir un conjunto a adecuado a través de su función característica $f : \omega \rightarrow 2$, es decir, vamos a diseñar N de modo que contenga una función f tal que $a = f^{-1}[\{1\}]$ resulte ser no constructible ^{N} . La razón para trabajar con funciones es que así es más fácil considerar aproximaciones parciales que puedan estar en M . Concretamente, definimos

$$\mathbb{P} = \{p \mid p \subset \omega \times 2 \wedge p \text{ es una función} \wedge p \text{ es finito}\}.$$

Claramente $\mathbb{P} = \mathbb{P}^M \in M$. A los elementos de \mathbb{P} los llamaremos “condiciones” y podemos verlos como “piezas” a partir de las cuales construiremos adecuadamente una función $f : \omega \rightarrow 2$, que a su vez determinará un conjunto $a = \{n \in \omega \mid f(n) = 1\} \subset \omega$. Más concretamente, lo que haremos será seleccionar un conjunto $G \subset \mathbb{P}$ de condiciones “verdaderas”, de modo que la función f será $f = \bigcup G$.

Así, si la condición $p = \{(3, 0), (5, 1), (7, 1)\}$ resulta ser verdadera (es decir, si pertenece al conjunto G que tomaremos como conjunto de condiciones verdaderas) tendremos que la función f que definiremos como $f = \bigcup G$ cumplirá $f(3) = 0$, $f(5) = f(7) = 1$ o, equivalentemente, que el conjunto a que definiremos como $a = f^{-1}[\{1\}]$ cumplirá $3 \notin a$, $5, 7 \in a$.

En todos los casos de interés (no sólo en este ejemplo en particular), trabajaremos con un conjunto \mathbb{P} de condiciones que contendrán información parcial sobre un objeto que queremos construir (en nuestro ejemplo una función $f : \omega \longrightarrow 2$), de modo que la construcción del objeto equivaldrá a elegir un conjunto adecuado G de condiciones verdaderas.

Si dos condiciones cumplen $p \subset q$, por ejemplo

$$p = \{(3, 0), (5, 1), (7, 1)\} \subset \{(0, 0), (1, 1), (3, 0), (5, 1), (7, 1)\} = q,$$

esto se traduce en que, la condición q contiene “más información” que p , de modo que si sabemos que q es verdadera, podemos asegurar que p también lo es, y este hecho no nos aporta ninguna información que no sepamos ya por el hecho de saber que q es verdadera. En estas condiciones diremos que q “extiende” a p y lo representaremos por $q \leq p$.

Puede parecer chocante que escribamos $q \leq p$ para indicar que q tiene más información que p , pero enseguida veremos que es la notación que enlaza adecuadamente con la teoría desarrollada en las secciones precedentes. Para verlo vamos a introducir los conceptos que nos permitirán tratar este ejemplo concreto en un contexto general:

Definición 4.14 Un *conjunto preordenado con máximo* es una terna $(\mathbb{P}, \leq, \mathbf{1})$ tal que \leq es una relación reflexiva y transitiva en el conjunto \mathbb{P} y $\mathbf{1} \in \mathbb{P}$ cumple que $\bigwedge p \in \mathbb{P} p \leq \mathbf{1}$. A los elementos de \mathbb{P} los llamaremos *condiciones*. Cuando dos condiciones $p, q \in \mathbb{P}$ cumplen $p \leq q$ se dice que la condición p *extiende* a la condición q .

No exigimos que la relación sea antisimétrica porque en ningún momento nos ayudaría en nada esta exigencia y en algunas construcciones más avanzadas es técnicamente útil no tener que garantizarla. En lo sucesivo, cuando hablaremos de un conjunto preordenado \mathbb{P} (abreviadamente, c.p.o.) se sobrentenderá que es un conjunto preordenado con máximo en el sentido de la definición anterior.

Notemos que si \mathbb{P} es un conjunto parcialmente ordenado (es decir, si el preorden es antisimétrico), entonces sólo puede tener un máximo, pero en el caso general \mathbb{P} puede tener varios máximos (incluso infinitos) y por ello seleccionamos uno en la definición de c.p.o. El tener que especificar un máximo en lugar de tener que existe un solo es el único “coste” que tendrá nuestra decisión de permitir que los preórdenes que consideremos no sean antisimétricos.

No obstante, casi todos los c.p.o.s que consideraremos en la práctica serán conjuntos parcialmente ordenados.

Si \mathbb{P} es un c.p.o., diremos que dos condiciones $p, q \in \mathbb{P}$ son *compatibles* si tienen una extensión común, es decir, si existe $r \in \mathbb{P}$ tal que $r \leq p$ y $r \leq q$. En caso contrario diremos que son *incompatibles* y lo representaremos por $p \perp q$.

Ejemplo El conjunto

$$\mathbb{P} = \{p \mid p \subset \omega \times 2 \wedge p \text{ es una función} \wedge p \text{ es finito}\}.$$

es claramente un conjunto parcialmente ordenado con la relación determinada por $q \leq p$ si y sólo si $p \subset q$, es decir, la relación inversa de la inclusión. Además tiene por máximo a la condición $\mathbf{1} = \emptyset$, que es trivialmente una función.

En todos los ejemplos de interés (en los que cada condición podrá considerarse como portadora de información parcial sobre un objeto que deseamos construir) el máximo será la condición que no aporta información alguna y que, por consiguiente, es trivialmente verdadera.

Observemos que en nuestro ejemplo dos condiciones p y q son compatibles (es decir, tienen una extensión común) si y sólo si son funciones que toman el mismo valor sobre cualquier número que esté en el dominio de ambas, y en tal caso $p \cup q$ es una extensión común. Recíprocamente, dos condiciones son incompatibles sin toman valores diferentes sobre un mismo número.

En general, la idea es que dos condiciones son compatibles si aportan información “coherente”, de modo que ambas pueden ser simultáneamente verdaderas, mientras que son incompatibles si se contradicen mutuamente, de modo que no pueden ser ambas verdaderas. ■

Tal y como se explica tras [TC 10.15], cuando aplicamos a un álgebra de Boole \mathbb{B} los conceptos definidos para c.p.o.s hay que entender que los aplicamos al conjunto parcialmente ordenado $\mathbb{B} \setminus \{\mathbb{0}\}$, aunque en muchos casos admiten una caracterización más natural si tenemos en cuenta el $\mathbb{0}$. Por ejemplo, dos condiciones $p, q \in \mathbb{B} \setminus \{\mathbb{0}\}$ son incompatibles si no tienen una extensión común en $\mathbb{B} \setminus \{\mathbb{0}\}$, pero como siempre se cumple que $p \wedge q$ es una extensión común en \mathbb{B} , concluimos que, en un álgebra de Boole,

$$p \perp q \leftrightarrow p \wedge q = \mathbb{0},$$

y en la práctica conviene extender esta definición para que valga incluso si p o q son $\mathbb{0}$.

Nuestro propósito es probar que podemos usar cualquier c.p.o. \mathbb{P} en lugar de un álgebra de Boole completa para construir una extensión genérica. El primer paso para ello es generalizar el concepto de ultrafiltro genérico:

Definición 4.15 Un *filtro* en un c.p.o. \mathbb{P} es un conjunto $G \subset \mathbb{P}$ tal que

- a) $\mathbf{1} \in G$,
- b) $\bigwedge p \in G \wedge q \in \mathbb{P}(p \leq q \rightarrow q \in G)$,
- c) $\bigwedge pq \in G \vee r \in G(r \leq p \wedge r \leq q)$.

Observemos que si \mathbb{B} es un álgebra de Boole, entonces $G \subset \mathbb{B}$ es un filtro en el sentido de la definición precedente (entendiendo esto como que es un filtro en el c.p.o. $\mathbb{B} \setminus \{\emptyset\}$) si y sólo si es un filtro en \mathbb{B} en el sentido usual [TC 10.34], es decir, si cumple:

- a) $\emptyset \notin G \wedge \mathbf{1} \in G$,
- b) $\bigwedge p \in G \bigwedge q \in \mathbb{B} (p \leq q \rightarrow q \in G)$,
- c) $\bigwedge pq \in G \quad p \wedge q \in G$.

Al trabajar con álgebras de Boole completas, el concepto de ultrafiltro genérico aparecía de forma natural como medio de “colapsar” valores booleanos y dividirlos en verdaderos y falsos. En el contexto que estamos considerando aquí, aunque es equivalente, podemos concebir los filtros de una forma diferente, a saber, como un medio de seleccionar un conjunto de “condiciones verdaderas” que determinen un objeto que queremos construir (en nuestro ejemplo una función $f : \omega \rightarrow 2$). Visto así, lo que expresa la definición de filtro es que la condición $\mathbf{1}$ tiene que ser trivialmente verdadera (y en un álgebra de Boole, si admitimos a \emptyset como condición, requerimos que sea trivialmente falsa), que si una condición aporta menos información que una condición verdadera (sobre el objeto que queremos construir) es que también es verdadera, y que a partir de dos condiciones verdaderas podemos formar una tercera condición también verdadera que aporte toda la información que contienen las dos dadas.

Ejemplo Si \mathbb{P} es el c.p.o. que estamos tomando como ejemplo y $f : \omega \rightarrow 2$, es inmediato que $G_f = \{p \in \mathbb{P} \mid p \subset f\}$ es un filtro en \mathbb{P} tal que $f = \bigcup G_f$, pero nuestro propósito es justo el contrario: definir una función f a partir de un filtro G y no un filtro G a partir de una función f , y a este respecto hay que observar que no todo filtro en G cumple que $\bigcup G$ sea una función $\omega \rightarrow 2$. Por ejemplo, $G = \{\mathbf{1}\}$ es obviamente un filtro que no define ninguna función en ω . ■

Sucede que la condición que necesitamos imponerle a G en este ejemplo para que defina realmente una función f y, de hecho, permita construir una extensión genérica $M[G]$ que contenga a f y, por consiguiente, al conjunto a que pretendemos definir a partir de f , es justamente la genericidad que hemos definido al tratar con álgebras de Boole, pero que en este contexto requiere una definición muy diferente:

Definición 4.16 Si \mathbb{P} es un c.p.o., un conjunto $D \subset \mathbb{P}$ es *denso* en \mathbb{P} si toda condición de \mathbb{P} tiene una extensión en D , es decir, si $\bigwedge p \in \mathbb{P} \bigvee q \in D \quad q \leq p$.

Un filtro G en \mathbb{P} es \mathbb{P} -genérico sobre un conjunto M si G corta a todo conjunto denso en \mathbb{P} que pertenezca a M .

Veremos luego (teorema 4.20) que los filtros genéricos en un álgebra de Boole completa en el sentido que acabamos de definir coinciden con los ultrafiltros genéricos en el sentido de la definición 4.11, pero antes vamos a familiarizarnos con esta definición alternativa:

Ejemplo Para el c.p.o. de nuestro ejemplo, formado por funciones finitas, sucede que el conjunto

$$A = \{p \in \mathbb{P} \mid (3, 0) \in p\}$$

no es denso en \mathbb{P} , pues la condición $q = \{(3, 1), (2, 0)\}$ no tiene una extensión en A , mientras que el conjunto

$$D = \{p \in \mathbb{P} \mid \bigvee n \in \omega (n, 0) \in p\}$$

sí que es denso en \mathbb{P} . Otros ejemplos de conjuntos densos son el conjunto de condiciones con un n dado en su dominio, o el conjunto de condiciones que toman los valores 0, 1, 1 sobre tres naturales consecutivos, o el conjunto de las condiciones que coinciden en un intervalo de números naturales con una codificación binaria del “Quijote”.

Supongamos ahora que M es un modelo transitivo de ZFC y que G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Definimos

$$f = \bigcup_{p \in G} p.$$

Es fácil probar que $f : \omega \rightarrow 2$. En efecto, el hecho de que las condiciones de G sean compatibles dos a dos prueba que f es una función. Para cada $n \in \omega$, el conjunto

$$D_n = \{p \in \mathbb{P} \mid \bigvee i \in 2 (n, i) \in p\} \in M$$

y es denso en \mathbb{P} . En efecto, la densidad es clara y D_n está en M porque la definición es absoluta, luego $D_n = D_n^M \in M$. Por consiguiente, existe una condición $p \in G \cap D_n$, de donde se sigue que n está en el dominio de f .

En un sentido un tanto vago, los objetos construidos a partir de filtros genéricos, como acabamos de hacer con f a partir de G , se llaman también “genéricos”. Así, f es una función genérica de ω en 2 y $a = f^{-1}[\{1\}]$ es un subconjunto genérico de ω (siempre respecto de un modelo dado M). La idea básica (que motiva el nombre de “genérico”) es que la función genérica f cumple cualquier propiedad que no se pueda refutar con una condición particular. Por ejemplo, no podemos asegurar que $f(5) = 1$, pues la condición $p = \{(5, 0)\}$ lo refuta, en el sentido de que si se cumpliera $p \in G$ necesariamente $f(5) = 0$, y no podemos descartar esta posibilidad. Por el contrario, sí que podemos asegurar que f toma el valor 1 en algún número natural, pues ninguna condición puede refutar esto, lo cual es otra forma de decir que el conjunto de las condiciones p que fuerzan $\bigvee n \in \omega f(n) = 1$ (en el sentido de que $p \in G$ implica esto) es denso en \mathbb{P} . Del mismo modo puede probarse que la función f toma el valor 1 siete veces seguidas y que, en un cierto intervalo, contiene una codificación binaria del “Quijote”.

Podemos decir que una función genérica es “tan general”, que no puede coincidir (en M) con ninguna función en particular. En efecto, dada cualquier $g \in M$ que cumpla $f : \omega \rightarrow 2$, necesariamente $f \neq g$, pues el conjunto

$$D_g = \{p \in \mathbb{P} \mid \bigvee n \in \mathcal{D} p \ p(n) \neq g(n)\}$$

es claramente denso en \mathbb{P} , luego existe $p \in G \cap D_g$, luego existe un $n \in \mathcal{D}p$ tal que $f(n) \neq g(n)$, luego $f \neq g$.

En otras palabras, una función que sea genérica respecto de un modelo M no puede estar en M . ■

Tenemos pendiente probar que los filtros genéricos sobre álgebras de Boole completas son los ultrafiltros genéricos que ya teníamos definidos. Para ello demostramos previamente algunas propiedades de los filtros genéricos.

Definición 4.17 Si \mathbb{P} es un c.p.o., $p \in \mathbb{P}$ y $E \subset \mathbb{P}$, diremos que E es *denso bajo p* si $\bigwedge q \in \mathbb{P}(q \leq p \rightarrow \bigvee r \in E r \leq q)$.

Teorema 4.18 Sea M un modelo transitivo de ZF, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea $E \in M$ un subconjunto de \mathbb{P} y G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces

- a) O bien $G \cap E \neq \emptyset$, o bien $\bigvee q \in G \bigwedge r \in E r \perp q$.
- b) Si $p \in G$ y E es denso bajo p , entonces $G \cap E \neq \emptyset$.

DEMOSTRACIÓN: a) Consideremos el conjunto

$$D = \{q \in \mathbb{P} \mid (\bigvee r \in E q \leq r) \vee (\bigwedge r \in E r \perp q)\} \in M.$$

Ciertamente D es denso en \mathbb{P} , pues si $q \in \mathbb{P}$ y $q \notin D$, entonces $\bigvee r \in E \neg r \perp q$, luego $\bigvee p \in \mathbb{P}(p \leq r \wedge p \leq q)$ y, como $r \in E \wedge p \leq r$, tenemos que $\bigvee p \in D p \leq q$. Por consiguiente $G \cap D \neq \emptyset$, luego $\bigvee q \in G((\bigvee r \in E q \leq r) \vee (\bigwedge r \in E r \perp q))$. De aquí se sigue $\bigvee r r \in G \cap E \vee \bigvee q \in G \bigwedge r \in E r \perp q$.

b) Si $G \cap E = \emptyset$, por a) tenemos que existe $q \in G$ tal que $\bigwedge r \in E r \perp q$. Sea $q' \in G$ tal que $q' \leq p \wedge q' \leq q$. Como E es denso bajo p , existe una condición $r \in E$ tal que $r \leq q' \leq q$, luego $\neg r \perp q$, contradicción. ■

Como consecuencia obtenemos que los filtros genéricos son maximales, por lo que en un álgebra de Boole son ultrafiltros:

Teorema 4.19 Sea M un modelo transitivo de ZF, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea G_1 un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sea G_2 un filtro en \mathbb{P} tal que $G_1 \subset G_2$. Entonces $G_1 = G_2$.

DEMOSTRACIÓN: Si existiera una condición $p \in G_2 \setminus G_1$, como $G_1 \cap \{p\} = \emptyset$, el teorema anterior nos da que existe $q \in G_1$ tal que $p \perp q$, pero p y q están ambos en G_2 , luego no pueden ser incompatibles. ■

Finalmente probamos la equivalencia con 4.11:

Teorema 4.20 Sea M un modelo transitivo de ZF y sea $\mathbb{B} \in M$ un álgebra de Boole completa^M. Entonces G es un filtro \mathbb{B} -genérico sobre M si y sólo si G es un ultrafiltro en \mathbb{B} tal que $\bigwedge X \in M(X \subset G \rightarrow \bigwedge X \in G)$.

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que G es un filtro \mathbb{B} -genérico sobre M . Entonces G es un ultrafiltro por el teorema anterior. Sea $X \in M$ tal que $X \subset G$. Entonces $G \cap X' = \emptyset$, luego por 4.18 existe un $p \in G$ tal que $p \wedge x' = \emptyset$, para todo $x \in X$, luego $p \leq x$ para todo $x \in X$, luego $p \leq \bigwedge X$, luego $\bigwedge X \in G$.

Supongamos ahora que G cumple las condiciones del enunciado y sea $D \in M$ un subconjunto denso de \mathbb{B} . Sea $X = D' \in M$. Si fuera $G \cap D = \emptyset$, como G es un ultrafiltro tendríamos $X \subset G$, luego por hipótesis $\bigwedge X \in G$, luego en particular $\bigwedge X \neq \emptyset$. Como D es denso, existe $p \in D$ (en particular $p \neq \emptyset$) tal que $p \leq \bigwedge X$, pero entonces $p \leq p'$, lo cual es absurdo. ■

Como muestra de la potencia de la caracterización de los ultrafiltros genéricos en el contexto de c.p.o.s arbitrarios observamos que tenemos un teorema trivial sobre existencia de filtros genéricos:

Teorema 4.21 *Si \mathbb{P} es un c.p.o., $p \in \mathbb{P}$ y M es un conjunto numerable, entonces existe un filtro G \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$.*

DEMOSTRACIÓN: El conjunto M contiene a lo sumo una cantidad numerable de subconjuntos densos en \mathbb{P} . Digamos que son $\{D_n\}_{n \in \omega}$. (Si no hubiera ninguno o hubiera un número finito completamos la sucesión con otros cualesquiera, admitiendo repeticiones.)

Definimos $p_0 = p$ y, supuesto definido p_n , tomamos $p_{n+1} \in D_n$ tal que $p_{n+1} \leq p_n$. Ahora basta definir

$$G = \{q \in \mathbb{P} \mid \bigvee n \in \omega p_n \leq q\}.$$

Es inmediato comprobar que G es un filtro en \mathbb{P} que contiene a p y, como $p_n \in G \cap D_n$, es claramente \mathbb{P} -genérico sobre M . ■

Así pues, toda condición puede ser verdadera respecto a un filtro genérico (sobre un conjunto numerable) elegido adecuadamente.

Terminamos esta sección con algunos resultados adicionales sobre filtros genéricos. En el ejemplo concreto que estamos considerando hemos visto que una función genérica no puede estar en el modelo base. Esto es un caso particular de un resultado general:

Definición 4.22 Si \mathbb{P} es un c.p.o. y $p \in \mathbb{P}$, diremos que p es un *átomo* si

$$\neg \bigvee qr \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge r \leq p \wedge q \perp r).$$

Diremos que \mathbb{P} es *no atómico* si no tiene átomos, es decir, si toda condición tiene extensiones incompatibles.

En [TC 10.23] vimos que en un álgebra de Boole una condición $p \neq \emptyset$ es un átomo si y sólo si no existe ninguna condición $\emptyset < q < p$.

Es claro que el c.p.o. de nuestro ejemplo es no atómico.

Teorema 4.23 Si M es un modelo transitivo⁷ de ZF, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. no atómico y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M entonces $G \notin M$.

DEMOSTRACIÓN: Si $G \in M$, entonces $D = \mathbb{P} \setminus G \in M$ y es un conjunto denso en \mathbb{P} . En efecto, dada $p \in \mathbb{P}$, tiene dos extensiones incompatibles q y r , de las cuales una al menos no puede estar en G , digamos q , con lo que $q \leq p \wedge q \in D$. Por definición de filtro genérico debería ser $G \cap D \neq \emptyset$, lo cual es absurdo. ■

Ejercicio: Demostrar el teorema anterior para álgebras de Boole completas usando la definición 4.11 de ultrafiltro genérico.

Por último, a veces es útil saber que la definición de filtro genérico puede debilitarse un poco:

Teorema 4.24 Sea M un modelo transitivo de ZF, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y $G \subset \mathbb{P}$. Entonces G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M si y sólo si cumple

- a) $\bigwedge pq \in G \quad \neg p \perp q,$
- b) $\bigwedge p \in G \bigwedge q \in \mathbb{P}(p \leq q \rightarrow q \in G),$
- c) $\bigwedge D \in M(D \text{ es denso en } \mathbb{P} \rightarrow G \cap D \neq \emptyset).$

DEMOSTRACIÓN: Como $\mathbb{P} \in M$ es denso en \mathbb{P} , la condición c) implica que G es no vacío, y entonces b) implica que $\mathbb{1} \in G$. Sólo falta probar que

$$\bigwedge pq \in G \bigvee r \in G(r \leq p \wedge r \leq q).$$

Lo que sabemos por a) es $\bigwedge pq \in G \bigvee r \in \mathbb{P}(r \leq p \wedge r \leq q)$. Tomemos dos condiciones $p, q \in G$ y sea $D = \{r \in \mathbb{P} \mid r \perp p \vee r \perp q \vee (r \leq p \wedge r \leq q)\}$. Es fácil ver que $D = D^M \in M$ y es denso en \mathbb{P} , pues si $t \in \mathbb{P}$, o bien $t \perp p$, en cuyo caso $t \in D$, o bien existe una condición $s \leq t \wedge s \leq p$. En este caso, o bien $s \perp q$, con lo que $s \in D \wedge s \leq t$, o bien existe una condición $u \leq s \wedge u \leq q$, con lo que $u \leq t \wedge u \in D$. En cualquier caso concluimos que t tiene una extensión en D .

Por c) concluimos que $G \cap D \neq \emptyset$, pero un $r \in G \cap D$ no puede cumplir ni $r \perp p$ ni $r \perp q$, por la condición a), luego $r \leq p \wedge r \leq q$. ■

4.4 Modelos genéricos

Ya hemos visto que la noción de “ultrafiltro genérico” puede generalizarse a c.p.o.s cualesquiera. Ahora vamos a ver cómo con un c.p.o. cualquiera \mathbb{P} en un modelo transitivo M de ZF y un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M es posible construir una extensión genérica $M[G]$ que, en el caso de partir de un álgebra de Boole completa, sea la que ya tenemos definida. Empezamos generalizando el concepto de “nombre”. Recordemos que una relación no es más que un conjunto de pares ordenados.

⁷Notemos que no exigimos que M sea numerable. Ni siquiera que sea un conjunto. Necesitamos la numerabilidad de M para garantizar la existencia de filtros genéricos, pero si, como en este caso, suponemos la existencia de uno, entonces M puede ser cualquier modelo.

Definición 4.25 Si \mathbb{P} es un c.p.o., diremos que un conjunto σ es un \mathbb{P} -nombre si σ es una relación y

$$(\tau, p) \in \sigma \rightarrow p \in \mathbb{P} \wedge \tau \text{ es un } \mathbb{P}\text{-nombre.}$$

Esta definición está justificada por el teorema general de recursión transfinita [TC 3.13] aplicado a la relación de pertenencia, en virtud del cual, para definir una función $H : V \rightarrow V$ sobre un conjunto x podemos suponerla definida sobre la clausura transitiva $\text{ct } x$. En nuestro caso definimos la función característica $H : V \rightarrow 2$ de la clase de los \mathbb{P} -nombres definiendo $H(\sigma)$ supuesto que H ya está definida sobre la clausura transitiva de σ , y la definición es

$$H(\sigma) = 1 \leftrightarrow \bigwedge x \in \sigma \bigvee \tau p (p \in \mathbb{P} \wedge \tau \in \text{ct } \sigma \wedge x = (\tau, p) \wedge H(\tau) = 1).$$

Así pues, un \mathbb{P} -nombre es un conjunto de pares ordenados cuyas primeras componentes son otros \mathbb{P} -nombres y sus segundas componentes son condiciones. Por ejemplo, es inmediato que $\sigma = \emptyset$ es un \mathbb{P} -nombre. Si p y q son condiciones, entonces $\tau = \{(\emptyset, p), (\emptyset, q)\}$ es otro \mathbb{P} -nombre, como también lo es $\{(\emptyset, 1), (\tau, p), (\tau, q)\}$, etc.

Llamaremos $V^\mathbb{P}$ a la clase de todos los \mathbb{P} -nombres. No es difícil ver que es una clase propia, aunque pronto será evidente. Una simple \in -inducción demuestra que la fórmula “ σ es un \mathbb{P} -nombre” es absoluta para modelos transitivos de ZF. Si M es un modelo transitivo de ZF, llamaremos $M^\mathbb{P} = V^\mathbb{P} \cap M$, es decir, a la clase de los \mathbb{P} -nombres que “ve” alguien que “viva” en M .

Nota Si comparamos esta definición de \mathbb{P} -nombre con la dada para álgebras de Boole completas, vemos que ahora no exigimos que los \mathbb{P} -nombres sean funciones, sino meramente relaciones. La idea es que, como no podemos tomar supremos e ínfimos, no podemos concentrar en una única condición la información necesaria para determinar en qué grado el objeto nombrado por un \mathbb{P} -nombre τ debe pertenecer al objeto nombrado por otro \mathbb{P} -nombre σ , de modo que no podemos exigir que haya una única condición p tal que $(\tau, p) \in \sigma$, sino que necesitamos admitir la posibilidad de que σ contenga diversos pares $(\tau, p), (\tau, q), (\tau, r), \dots$ de modo que entre todos determinen si τ_G debe o no pertenecer a σ_G . ■

Definición 4.26 Sea \mathbb{P} un c.p.o. y G un filtro en \mathbb{P} . Definimos el *valor* de un \mathbb{P} -nombre σ respecto de G como

$$\sigma_G = \{\tau_G \mid \bigvee p \in G \ (\tau, p) \in \sigma\}.$$

De nuevo esta definición ha de entenderse por \in -recursión. También es fácil ver que σ_G es absoluto para modelos transitivos de ZF.

Por ejemplo, es inmediato que $\emptyset_G = \emptyset$. Si $\sigma = \{(\emptyset, p)\}$, entonces

$$\sigma_G = \begin{cases} \emptyset & \text{si } p \notin G, \\ \{\emptyset\} & \text{si } p \in G. \end{cases}$$

Definición 4.27 Sea M un modelo transitivo de ZF, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Definimos la *extensión genérica* de M determinada por G como la clase

$$M[G] = \{\sigma_G \mid \sigma \in M^\mathbb{P}\}.$$

Vamos a probar que, pese a lo arbitraria que pueda parecer esta definición, el resultado es completamente natural, en el sentido de que $M[G]$ es el menor modelo transitivo N de ZF tal que $M \subset N$ y $G \in N$, es decir, el menor modelo que podemos considerar si queremos incorporar G a M .

Claramente $M[G]$ es un conjunto (numerable) si M lo es. La transitividad es fácil de probar:

Teorema 4.28 Si M es un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces $M[G]$ es una clase transitiva.

DEMOSTRACIÓN: Tomamos $x \in y \in M[G]$ y hemos de probar que $x \in M[G]$. Tenemos que $y = \sigma_G$, para un $\sigma \in M^\mathbb{P}$, y entonces existen $p \in G$ y $\tau \in V^\mathbb{P}$ de modo que $(\tau, p) \text{ n}\sigma$ y $x = \tau_G$. Por la transitividad de M ha de ser $\tau \in M^\mathbb{P}$, luego $x = \tau_G \in M[G]$. ■

Ahora hemos de probar que $M \subset M[G]$. Para ello hemos de asignar un nombre a cada conjunto de M .

Definición 4.29 Si \mathbb{P} es un c.p.o., definimos el \mathbb{P} -nombre *canónico* de un conjunto x como

$$\check{x} = \{(\check{y}, \mathbb{1}) \mid y \in x\}.$$

De nuevo se trata de una definición por \in -recursión. Relativizando a un modelo transitivo la fórmula

$$\Lambda u(u \in \check{x} \leftrightarrow \forall y \in x u = (\check{y}, \mathbb{1}))$$

y razonando por \in -inducción se concluye inmediatamente que \check{x} es absoluto para modelos transitivos de ZF. En particular, si M es un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P} \in M$ y $x \in M$, entonces $\check{x} \in M^\mathbb{P}$.

Una simple inducción demuestra así mismo que si G es un filtro sobre \mathbb{P} entonces $\Lambda x \check{x}_G = x$. Incidentalmente, esto muestra que la aplicación $V \longrightarrow V^\mathbb{P}$ dada por $x \mapsto \check{x}$ es inyectiva, por lo que $V^\mathbb{P}$ es una clase propia.

Teorema 4.30 Si M es un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces $M \subset M[G]$.

DEMOSTRACIÓN: Si $x \in M$, entonces $\check{x} \in M^\mathbb{P}$, luego $x = \check{x}_G \in M[G]$. ■

Para probar que $G \in M[G]$ hemos de encontrarle un nombre:

Definición 4.31 Si \mathbb{P} es un c.p.o., definimos el *nombre canónico de un filtro genérico* para \mathbb{P} como

$$\Gamma = \{(\check{p}, p) \mid p \in \mathbb{P}\} \in V^\mathbb{P}.$$

Es inmediato comprobar que Γ es absoluto para modelos transitivos de ZF, así como que si G es un filtro en \mathbb{P} entonces $\Gamma_G = G$. Como consecuencia:

Teorema 4.32 *Si M es un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M entonces $M[G]$ es una clase transitiva, $M \subset M[G]$, $G \in M[G]$ y si N es un modelo transitivo de ZF tal que $M \subset N$ y $G \in N$ entonces $M[G] \subset N$.*

DEMOSTRACIÓN: Claramente $\Gamma = \Gamma^M \in M^\mathbb{P}$, luego $G = \Gamma_G \in M[G]$. Sólo falta probar la afirmación sobre N . Ahora bien, si $x \in M[G]$ entonces $x = \sigma_G$, para cierto $\sigma \in M^\mathbb{P}$. Como $\sigma, G \in N$, concluimos que $x = \sigma_G = (\sigma_G)^N \in N$. ■

Así pues, cuando hayamos probado que $M[G]$ es un modelo de ZF tendremos de hecho que, tal y como ya hemos avanzado, es el menor modelo de ZF que contiene a M como subconjunto y a G como elemento.

De acuerdo con las observaciones que hemos hecho al comienzo del capítulo, el hecho siguiente será fundamental:

Teorema 4.33 *Si M es un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces $\Omega^M = \Omega^{M[G]}$, es decir, M y $M[G]$ contienen los mismos ordinales.*

DEMOSTRACIÓN: En primer lugar observamos que si \mathbb{P} es un c.p.o. arbitrario, $\sigma \in V^\mathbb{P}$ y G es un filtro en \mathbb{P} , entonces $\text{rang } \sigma_G \leq \text{rang } \sigma$.

En efecto, razonamos por \in -inducción. Si es cierto para los nombres de la clausura transitiva de σ , llamamos $A = \{\tau \in V^\mathbb{P} \mid \forall p \in G \ (\tau, p) \in \sigma\}$. Así

$$\text{rang } \sigma_G = \bigcup_{x \in \sigma_G} (\text{rang } x + 1) = \bigcup_{\tau \in A} (\text{rang } \tau_G + 1) \leq \bigcup_{\tau \in A} (\text{rang } \tau + 1).$$

Ahora bien, si $\tau \in A$ entonces hay un $p \in G$ tal que $(\tau, p) \in \sigma$, luego

$$\text{rang } \tau < \text{rang } (\tau, p) < \text{rang } \sigma.$$

Concluimos, pues, que $\text{rang } \sigma_G \leq \text{rang } \sigma$.

Teniendo esto en cuenta, si tomamos un ordinal $\alpha \in \Omega^{M[G]}$, entonces $\alpha = \sigma_G$, para un cierto $\sigma \in M^\mathbb{P}$. Según hemos probado, $\alpha = \text{rang } \sigma_G \leq \text{rang } \sigma \in \Omega^M$, luego también $\alpha \in \Omega^M$. La inclusión $\Omega^M \subset \Omega^{M[G]}$ es consecuencia inmediata de la inclusión $M \subset M[G]$. ■

No estamos en condiciones de demostrar que $M[G]$ es un modelo de ZF, pero sí podemos probar que cumple la mayoría de los axiomas:

Teorema 4.34 *Si M es un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces $M[G]$ cumple los axiomas de extensiónalidad, par, unión regularidad, vacío e infinitud.*

DEMOSTRACIÓN: El axioma de extensionalidad se cumple porque $M[G]$ es transitivo. Suponiendo el axioma de regularidad, éste se cumple en cualquier clase. Vacío e infinitud se cumplen en $M[G]$ porque $\emptyset, \omega \in M \subset M[G]$.

Para probar el axioma del par observamos que si $x, y \in M[G]$, digamos $x = \sigma_G, y = \tau_G$, con $\sigma, \tau \in M^{\mathbb{P}}$, entonces $\rho = \{(\sigma, \mathbb{1}), (\tau, \mathbb{1})\} \in M^{\mathbb{P}}$ cumple $\rho_G = \{x, y\} \in M[G]$.

Para el axioma de la unión tomamos un conjunto $x = \sigma_G \in M[G]$ y definimos

$$\pi = \{(\rho, p) \mid p \in \mathbb{P} \wedge \bigvee \tau q r ((\tau, q) \in \sigma \wedge (\rho, r) \in \tau \wedge p \leq r \wedge p \leq q)\} \in M^{\mathbb{P}}.$$

Basta probar que $\pi_G = \bigcup x$.

Tomemos $z \in \bigcup x$, de modo que existe un $y \in x$ tal que $z \in y$. Como $y \in \sigma_G$, ha de ser $y = \tau_G$, de modo que $\tau \in M^{\mathbb{P}}$ y existe un $q \in G$ tal que $(\tau, q) \in \sigma$. Como $z \in \tau_G$ ha de ser $z = \rho_G$, donde $\rho \in M^{\mathbb{P}}$ y existe $r \in G$ tal que $(\rho, r) \in \tau$. Puesto que G es un filtro existe un $p \in G$ tal que $p \leq q \wedge p \leq r$. Claramente, $(\rho, p) \in \pi$, luego $z = \rho_G \in \pi_G$.

Recíprocamente, si $z \in \pi_G$ entonces $z = \rho_G$, para cierto $\rho \in M^{\mathbb{P}}$, y existe un $p \in G$ tal que $(\rho, p) \in \pi$. Sean τ, q, r según la definición de π . Como G es un filtro se cumple que $q, r \in G$, luego $z = \rho_G \in \tau_G \in \sigma_G = x$, con lo que $z \in \bigcup x$. ■

Conviene extender y generalizar la idea que hemos empleado para probar que $M[G]$ cumple el axioma del par:

Definición 4.35 Si \mathbb{P} es un c.p.o. y $\sigma, \tau \in V^{\mathbb{P}}$, definimos los nombres

$$\text{pd}(\sigma, \tau) = \{(\sigma, \mathbb{1}), (\tau, \mathbb{1})\}, \quad \text{po}(\sigma, \tau) = \text{pd}(\text{pd}(\sigma, \sigma), \text{pd}(\sigma, \tau)).$$

Es inmediato comprobar que estas definiciones son absolutas para modelos transitivos de ZF, así como que si G es un filtro en \mathbb{P} entonces

$$\text{pd}(\sigma, \tau)_G = \{\sigma_G, \tau_G\}, \quad \text{po}(\sigma, \tau)_G = (\sigma_G, \tau_G).$$

Queda pendiente demostrar que $M[G]$ cumple los axiomas de reemplazo y partes, así como el axioma de elección supuesto que lo cumpla M . Esencialmente, el problema es construir nombres adecuados para conjuntos adecuados. Por ejemplo, acabamos de ver como, dados dos nombres σ y τ , podemos construir un nombre $\text{pd}(\sigma, \tau)$ del que tenemos la garantía de que en $M[G]$ nombrará a $\{\sigma_G, \tau_G\}$. En la prueba del teorema anterior, dado un nombre σ , hemos construido un nombre π (sin hacer referencia a G , y esto es imprescindible para que podamos asegurar que $\pi \in M$) que, independientemente de cuál sea el filtro G , cumple $\pi_G = \bigcup \sigma_G$. Similarmente, para demostrar que $M[G]$ cumple el axioma de partes, dado un nombre σ tenemos que construir un nombre π (sin hacer referencia a filtros) del que podamos garantizar que en cualquier extensión genérica se cumplirá $\pi_G = \mathcal{P}\sigma_G$. En el caso del axioma del par la construcción del nombre oportuno ha sido muy sencilla, en el caso del axioma de la unión ha sido algo más complicada, y en el caso del axioma de partes no podemos llevarla a cabo sin recurrir a los resultados sintácticos que hemos desarrollado en las primeras

secciones para álgebras de Boole completas,⁸ y que nos permiten, hasta cierto punto, “predecir” sin salir de M lo que va a suceder en $M[G]$.

Para poder aprovechar los resultados que hemos obtenido sobre extensiones con álgebras de Boole completas, lo primero que necesitamos demostrar es que las dos definiciones que hemos dado de $M[G]$ en 4.10 y 4.27 son equivalentes.

Concretamente, si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa, tenemos definida la clase $V^{\mathbb{B}}$ de todos los \mathbb{B} -nombres y la clase $V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ de todos los \mathbb{B} -nombres extensionales. Si M es un modelo transitivo de ZF y $\mathbb{B} \in M$ es un álgebra de Boole completa ^{M} , tenemos definidos $M^{\mathbb{B}}$ y $M_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ y si G es un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M , tenemos dos definiciones distintas de $M[G]$, según los nombres que consideremos. Vamos a ver que $M[G]$ es el mismo en ambos casos.

En primer lugar observamos que los \mathbb{B} -nombres extensionales son un caso particular de \mathbb{B} -nombres salvo por el hecho de que hemos admitido que contengan pares (τ, \emptyset) , los cuales no pueden aparecer en un \mathbb{B} -nombre σ si el c.p.o. considerado es $\mathbb{B} \setminus \{\emptyset\}$. Ahora bien, la presencia de tales pares es irrelevante, porque la presencia de tales pares no influye en el cálculo de σ_G .

Concretamente, si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa, podemos definir recurrentemente una aplicación $V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}} \longrightarrow V^{\mathbb{B}}$ mediante

$$\bar{\sigma} = \{(\bar{\tau}, p) \mid (\tau, p) \in \sigma \wedge p \neq \emptyset\}.$$

Es fácil probar que si M es un modelo transitivo de ZF, \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa ^{M} , G es un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M y $\sigma \in M_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$, entonces $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}^M \in M^{\mathbb{B}}$ y, $\sigma_G = \bar{\sigma}_G$. Por consiguiente $M[G]_{\text{ext}} \subset M[G]$.

La inclusión contraria se demuestra de forma similar, pero la aplicación $V^{\mathbb{B}} \longrightarrow V_{\text{ext}}^{\mathbb{B}}$ es un poco más sofisticada. Como en el caso anterior, definimos $\bar{\sigma}$ supuesto definido $\bar{\pi}$ para todo $\pi \in \mathcal{D}\sigma$. Para ello consideramos el mínimo ordinal α tal que $\{\bar{\pi} \mid \pi \in \mathcal{D}\sigma\} \subset V_{\alpha}^{\mathbb{B}}$ y definimos $\bar{\sigma} : V_{\alpha}^{\mathbb{B}} \longrightarrow \mathbb{B}$ mediante

$$\bar{\sigma}(\rho) = \bigvee \{\|\bar{\pi} = \rho\| \wedge p \mid (\pi, p) \in \sigma\}.$$

Fijado $(\pi, p) \in \sigma$, por el teorema 4.4 tenemos que

$$\|\bar{\pi} = \pi\| \wedge p \wedge \|\pi = \rho\| \leq \|\bar{\pi} = \rho\| \wedge p \leq \bar{\sigma}(\rho),$$

y tomando el supremo en (π, p) queda $\bar{\sigma}(\pi) \wedge \|\pi = \rho\| \leq \bar{\sigma}(\rho)$. Esto prueba que $\bar{\sigma}$ es extensional y que, por consiguiente, $\bar{\sigma} \in V_{\alpha+1}^{\mathbb{B}}$.

Es fácil ver que el término $\bar{\sigma}$ así definido es absoluto para modelos transitivos de ZF.

Teorema 4.36 *Sea M un modelo transitivo de ZF, sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa ^{M} y sea $\sigma \in M^{\mathbb{B}}$. Si G es un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M , entonces $\bar{\sigma}_G = \sigma_G$.*

⁸Sin perjuicio de que dichos resultados sintácticos pueden formularse también en términos de c.p.o.s arbitrarios, sin hacer referencia a álgebras de Boole. Véase el apéndice A, en el que mostramos una forma alternativa de continuar a partir de este punto.

DEMOSTRACIÓN: Razonamos por inducción sobre $\text{rang } \sigma$. Si $x \in \bar{\sigma}_G$, entonces $x = \rho_G$, de modo que

$$\bar{\sigma}(\rho) = \bigvee \{ \|\bar{\pi} = \rho\| \wedge p \mid (\pi, p) \in \sigma \} \in G.$$

Como G es genérico, esto implica que existe $(\pi, p) \in \sigma$ tal que $\|\bar{\pi} = \rho\| \wedge p \in G$, luego $\|\bar{\pi} = \rho\| \in G$ y $p \in G$. Por hipótesis de inducción $\bar{\pi}_G = \pi_G$, con lo que

$$x = \rho_G = \bar{\pi}_G = \pi_G \in \sigma_G.$$

Recíprocamente, si $x \in \sigma_G$, entonces $x = \pi_G$, con $(\pi, p) \in \sigma$ y $p \in G$. Por hipótesis de inducción $\pi_G = \bar{\pi}_G$ y $\|\bar{\pi} = \bar{\pi}\| = \mathbf{1}$, luego $\|\bar{\pi} = \bar{\pi}\| \wedge p \in G$, luego

$$\bar{\sigma}(\bar{\pi}) = \bigvee \{ \|\bar{\xi} = \bar{\pi}\| \wedge p \mid (\xi, p) \in \sigma \} \in G,$$

luego $x = \pi_G = \bar{\pi}_G \in \bar{\sigma}_G$. \blacksquare

Con esto queda demostrado que $M[G] = M[G]_{\text{ext}}$, es decir, que restringir los \mathbb{B} -nombres a nombres extensionales no altera la extensión genérica.

Definición 4.37 Sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{B}}$. Para cada fórmula metamatemática $\phi(x_1, \dots, x_n)$, definimos

$$\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\| \equiv \|\phi(\bar{\sigma}_1, \dots, \bar{\sigma}_n)\|.$$

El teorema anterior implica trivialmente que el teorema 4.12 es válido para \mathbb{B} -nombres de $V^{\mathbb{B}}$, pues

$$\|\sigma = \tau\| \in G \leftrightarrow \|\bar{\sigma} = \bar{\tau}\| \in G \leftrightarrow \bar{\sigma}_G = \bar{\tau}_G \leftrightarrow \sigma_G = \tau_G,$$

e igualmente sucede con $\|\sigma \in \tau\|$. A su vez, la prueba del teorema 4.13 vale ahora trivialmente considerando nombres en $V^{\mathbb{B}}$ usando la versión correspondiente del teorema 4.12 al principio de la inducción.

Como aplicación podemos demostrar el teorema 4.9 casi completamente:

DEMOSTRACIÓN (de 4.9): De momento demostraremos el teorema para fórmulas sin descriptores equivalentes en ZF menos los axiomas de reemplazo y partes, pero pronto veremos que vale para ZFC.

El teorema de reflexión 2.24 nos asegura que, para cada sentencia ψ existe un modelo transitivo numerable M de ZFC tal que $\psi \leftrightarrow \psi^M$, luego para demostrar un teorema en ZFC basta demostrar que se cumple en todo modelo transitivo numerable. Fijamos dos fórmulas ϕ y ψ sin descriptores tales que en ZF sin reemplazo ni el axioma de partes se demuestre

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n (\phi(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \psi(x_1, \dots, x_n))$$

y consideramos la sentencia:

Si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completo y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{B}}$ entonces se cumple $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \|\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|$.

Según hemos indicado, para probar en ZFC que se cumple esta sentencia basta tomar un modelo transitivo numerable M arbitrario y demostrar que se cumple su relativización a M . Para ello tomamos $\mathbb{B} \in M$ un álgebra de Boole completa ^{M} y hemos de demostrar que

$$\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M = \|\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M$$

para $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{B}}$. Ahora bien, esto equivale a que

$$\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow \psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M = \mathbb{1}.$$

Si esto no se cumpliera, por el teorema 4.21 existiría un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M tal que $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow \psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|'^M \in G$, y por el teorema fundamental

$$\neg(\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \psi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})),$$

pero por otra parte sabemos que

$$\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \psi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$$

porque ϕ y ψ son equivalentes en ZF (menos reemplazo y partes) y sabemos que $M[G]$ es un modelo transitivo de ZF (menos reemplazo y partes), contradicción. Además, queda claro que en cuanto hayamos probado que $M[G]$ es un modelo de ZFC este argumento probará el teorema para fórmulas equivalentes en ZFC. ■

Como toda fórmula es equivalente a una fórmula sin descriptores sin necesidad de más axiomas que el de extensionalidad y el del conjunto vacío, la versión restringida de 4.9 que acabamos de probar es suficiente para justificar la definición del valor booleano $\|\phi\|$ para fórmulas con descriptores, así que a partir de aquí ya no necesitamos preocuparnos por los descriptores.

Más aún, como caso particular hemos probado que si dos fórmulas ϕ y ψ son lógicamente equivalentes, entonces $\|\phi\| = \|\psi\|$, por lo que tampoco tenemos que preocuparnos por la forma concreta en la que escribimos una fórmula entre varias opciones lógicamente equivalentes.

A continuación vamos a ver que toda extensión genérica construida a partir de un c.p.o. puede obtenerse igualmente mediante un álgebra de Boole completa.

Recordemos [TC 10.15] el concepto de inmersión entre c.p.o.s:

Definición 4.38 Sean \mathbb{P} y \mathbb{Q} dos c.p.o.s. Diremos que $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ es una *inmersión* si cumple

- a) $\bigwedge pp' \in \mathbb{P}(p \leq p' \rightarrow i(p) \leq i(p'))$,
- b) $\bigwedge pp' \in \mathbb{P}(p \perp p' \rightarrow i(p) \perp i(p'))$.

Diremos que i es una *inmersión completa* si además cumple

- c) $\bigwedge q \in \mathbb{Q} \bigvee p \in \mathbb{P} \bigwedge p' \in \mathbb{P}(p' \leq p \rightarrow \neg i(p') \perp q)$.

En tal caso diremos que p es una *reducción* de q a \mathbb{P} .

Una inmersión $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ es *densa* si $i[\mathbb{P}]$ es denso en \mathbb{Q} .

Diremos que $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ es una *semejanza* si es biyectiva y

$$\bigwedge pp' \in \mathbb{P}(p \leq p' \leftrightarrow i(p) \leq i(p')).$$

En [TC 10.17] probamos que las inmersiones completas entre álgebras de Boole completas coinciden con los monomorfismos completos, en el sentido de monomorfismos de álgebras que conservan supremos e ínfimos, mientras que las inmersiones densas son, de hecho, isomorfismos (véase la observación tras el teorema [TC 10.20]). Además, según [TC 10.22], para todo c.p.o. \mathbb{P} existe una inmersión densa $i : \mathbb{P} \rightarrow R(\mathbb{P})$ en un álgebra de Boole completa, única salvo isomorfismo.

Teorema 4.39 *Sea M un modelo transitivo de ZF, sean $\mathbb{P}, \mathbb{Q} \in M$ dos c.p.o.s y sea $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa, $i \in M$. Sea H un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M . Entonces $G = i^{-1}[H]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M .*

DEMOSTRACIÓN: Probaremos que G es \mathbb{P} -genérico sobre M mediante el teorema 4.24. Si $p, q \in G$, entonces $i(p), i(q) \in H$, luego $\neg i(p) \perp i(q)$, luego $\neg p \perp q$.

Si $p \in G$ y $q \in \mathbb{P}$ cumple $p \leq q$ entonces $i(p) \in H \wedge i(p) \leq i(q)$, luego $i(q) \in H$, luego $q \in G$.

Si $D \in M$ es denso en \mathbb{P} pero $G \cap D = \emptyset$, entonces $H \cap i[D] = \emptyset$. Por el teorema 4.18 existe un $q \in H$ incompatible con todos los elementos de $i[D]$. Sea p una reducción de q a \mathbb{P} y sea $p' \leq p$ tal que $p' \in D$. Entonces $i(p') \in i[D]$, pero es compatible con q , contradicción.

Así pues, G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . ■

Si la inmersión es densa, los filtros \mathbb{P} -genéricos se corresponden biunívocamente con los \mathbb{Q} -genéricos:

Teorema 4.40 *Sea M un modelo transitivo de ZF, sean $\mathbb{P}, \mathbb{Q} \in M$ dos c.p.o.s e $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión densa, $i \in M$. Para cada $G \subset \mathbb{P}$ sea*

$$\hat{i}(G) = \{q \in \mathbb{Q} \mid \bigvee p \in G i(p) \leq q\}.$$

- a) Si H es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M entonces $G = i^{-1}[H]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y $H = \hat{i}(G)$.
- b) Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M entonces $H = \hat{i}(G)$ es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M y $G = i^{-1}[H]$.

DEMOSTRACIÓN: a) El teorema anterior nos da que G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Demostraremos que $H = \hat{i}(G)$ después de probar b).

b) Veamos que H es un filtro. Claramente $\mathbf{1} \in H$.

Si $p, q \in H$, existen $r, s \in G$ tales que $i(r) \leq p \wedge i(s) \leq q$, luego existe un $t \in G$ tal que $t \leq r \wedge t \leq s$. Entonces $i(t) \in H \wedge i(t) \leq p \wedge i(t) \leq q$.

Si $p \in H$ y $q \in \mathbb{Q}$ cumple $p \leq q$, entonces hay un $r \in G$ tal que $i(r) \leq p \leq q$, luego $q \in H$.

Sea ahora $D \in M$ un conjunto denso en \mathbb{Q} . Sea

$$D^* = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall q \in D \ i(p) \leq q\} \in M.$$

Se cumple que D^* es denso en \mathbb{P} , pues si $p \in \mathbb{P}$, existe $q \in D$ tal que $q \leq i(p)$. Como i es densa, existe un $p' \in \mathbb{P}$ tal que $i(p') \leq q \leq i(p)$. Entonces $\neg i(p) \perp i(p')$, luego $\neg p \perp p'$. Sea $p'' \in \mathbb{P}$ tal que $p'' \leq p \wedge p'' \leq p'$. Así, $p'' \in D^*$, pues $i(p'') \leq i(p') \leq q \in D$, y por otra parte $p'' \leq p$.

Por consiguiente $D^* \cap G \neq \emptyset$, lo que significa que existen $p \in G$ y $q \in D$ tales que $i(p) \leq q$, de donde $q \in D \cap H \neq \emptyset$.

Tenemos así que H es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M .

Por la parte probada de a) se cumple que $i^{-1}[H]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y claramente $G \subset i^{-1}[H]$. Según el teorema 4.19 ha de ser $G = i^{-1}[H]$.

Volviendo a a), es inmediato comprobar que $\hat{i}(G) \subset H$ y por b) tenemos que $\hat{i}(G)$ es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M . Por 4.19 concluimos que $H = \hat{i}(G)$. ■

Ahora pasamos a relacionar las extensiones genéricas:

Definición 4.41 Si $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ es una aplicación entre c.p.o.s, definimos la aplicación $\bar{i} : V^\mathbb{P} \rightarrow V^\mathbb{Q}$ mediante

$$\bar{i}(\sigma) = \{(\bar{i}(\tau), i(p)) \mid (\tau, p) \in \sigma\}.$$

Claramente se trata de una definición por \in -recursión. Una simple inducción prueba que si $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ y $j : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}$, entonces $\bar{i} \circ \bar{j} = \bar{i} \circ j$. También es claro que la identidad induce la aplicación identidad, de donde a su vez se sigue que \bar{i} es inyectiva, suprayectiva o biyectiva si lo es i .

Se prueba sin dificultad que el término \bar{i} es absoluto para modelos transitivos de ZF. Esto se traduce en que si M es un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P}, \mathbb{Q} \in M$ son dos c.p.o.s e $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ cumple $i \in M$, entonces \bar{i} se restringe a una aplicación $\bar{i} : M^\mathbb{P} \rightarrow M^\mathbb{Q}$.

En lo sucesivo escribiremos i en lugar de \bar{i} salvo que haya posibilidad de confusión.

Similarmente definimos $\bar{i}^{-1} : V^\mathbb{Q} \rightarrow V^\mathbb{P}$ mediante

$$\bar{i}^{-1}(\sigma) = \{(\bar{i}^{-1}(\tau), p) \mid \forall q \in \mathbb{Q} ((\tau, q) \in \sigma \wedge i(p) \leq q)\}.$$

Nuevamente se trata de una definición por \in -recursión y el término es absoluto para modelos transitivos de ZF. Escribiremos i^{-1} en lugar de \bar{i}^{-1} cuando no dé lugar a confusión.

Teorema 4.42 *Sea M un modelo transitivo de ZF, sean $\mathbb{P}, \mathbb{Q} \in M$ dos c.p.o.s e $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa $i \in M$. Sea H un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M y $G = i^{-1}[H]$.*

- a) Si $\sigma \in M^{\mathbb{P}}$, entonces $\sigma_G = i(\sigma)_H$. En particular $M[G] \subset M[H]$.
- b) Si la inmersión es densa y $\sigma \in M^{\mathbb{Q}}$, entonces $i^{-1}(\sigma)_G = \sigma_H$. En particular $M[G] = M[H]$.

DEMOSTRACIÓN: Probamos a) por inducción sobre el rango de σ : Supongamos que $x \in i(\sigma)_H$. Entonces $x = i(\tau)_H$, con $(\tau, p) \in \sigma$, $i(p) \in H$. Por tanto, $p \in G$ y por hipótesis de inducción $x = \tau_G$. Esto implica que $x \in \sigma_G$. El recíproco es análogo.

Para probar b) suponemos que la inmersión es densa y probamos b) por inducción sobre el rango de σ . Si $x \in i^{-1}(\sigma)_G$, entonces $x = i^{-1}(\tau)_G$, y existen $p \in G$, $q \in \mathbb{Q}$ de modo que $i(p) \leq q$ y $(\tau, q) \in \sigma$. Entonces $i(p) \in H$, luego también $q \in H$ y, por hipótesis de inducción, $x = \tau_H \in \sigma_H$.

Supongamos ahora que $x \in \sigma_H$. Entonces $x = \tau_H$ y existe $q \in H$ tal que $(\tau, q) \in \sigma$. Por el teorema 4.40 sabemos que $H = \hat{i}(G)$, luego existe un $p \in G$ tal que $i(p) \leq q$, luego $(i^{-1}(\tau), p) \in i^{-1}(\sigma)$, luego por hipótesis de inducción $x = i^{-1}(\tau)_G \in i^{-1}(\sigma)_G$. ■

Así pues, una extensión genérica obtenida con un c.p.o. \mathbb{P} puede obtenerse igualmente con su compleción $R(\mathbb{P})$. Veamos ahora cómo enunciar el teorema fundamental (que es válido para $R(\mathbb{P})$) en términos de \mathbb{P} exclusivamente. Para ello introducimos un nuevo concepto (indicamos con un asterisco que la definición es provisional):

Definición 4.43 Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula (metamatemática) con a lo sumo las variables libres indicadas. Sea M un modelo transitivo de ZF, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{P}}$ y sea $p \in \mathbb{P}$. Diremos que p fuerza $\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, y lo representaremos por $p \Vdash^* \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, si

$$\bigwedge G(G \text{ es } \mathbb{P}\text{-genérico sobre } M \wedge p \in G \rightarrow \phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})).$$

Para álgebras de Boole completas este concepto no aporta mucho:

Teorema 4.44 Sea M un modelo transitivo numerable de ZF, sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa M y sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{B}}$. Entonces

$$p \Vdash^* \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow p \leq \|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M,$$

es decir, que $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M$ es la máxima condición que fuerza ϕ .

DEMOSTRACIÓN: El teorema fundamental implica que $\|\phi\|^M$ fuerza ϕ y, si $p \Vdash^* \phi$, tiene que ser $p \leq \|\phi\|^M$, pues en caso contrario, por el teorema 4.21, existiría un ultrafiltro genérico G que contendría a $p \wedge \|\phi\|'$, y se cumpliría $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$ a pesar de que $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|^M \notin G$, contradicción. ■

El interés de \Vdash^* es que, al contrario que $\|\cdot\|^M$, tiene sentido para c.p.o.s arbitrarios. Lo importante es que existen condiciones que fuerzan fórmulas. El tener una máxima condición (que, por consiguiente, determine a las demás) es una simplificación elegante desde un punto de vista teórico, pero no es esencial en la práctica.

Teorema 4.45 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sean $\mathbb{P}, \mathbb{Q} \in M$ dos c.p.o.s e $i : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa $i \in M$.

a) Si $\phi(x_1, \dots, x_n)$ es una fórmula absoluta para modelos transitivos de ZFC, $\tau_1, \dots, \tau_n \in M^{\mathbb{P}}$ y $p \in \mathbb{P}$, entonces

$$p \Vdash^* \phi(\tau_1, \dots, \tau_n) \leftrightarrow i(p) \Vdash^* \phi(i(\tau_1), \dots, i(\tau_n)).$$

b) Si i es una inmersión densa, el apartado a) vale para fórmulas cualesquiera.

DEMOSTRACIÓN: Probamos a) y b) simultáneamente. Supongamos que $p \Vdash^* \phi(\tau_1, \dots, \tau_n)$. Sea H un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M tal que $i(p) \in H$. Entonces $p \in G = i^{-1}[H]$, luego se cumple $\phi^{M[G]}(\tau_{1G}, \dots, \tau_{nG})$, lo cual, por 4.42, es lo mismo que $\phi^{M[G]}(i(\tau_1)_H, \dots, i(\tau_n)_H)$. Esto equivale a $\phi^{M[H]}(i(\tau_1)_H, \dots, i(\tau_n)_H)$, ya sea porque $M[G] \subset M[H]$ y ϕ es absoluta (en el caso a) o bien porque $M[G] = M[H]$ (en el caso b). Esto demuestra que $i(p) \Vdash^* \phi(i(\tau_1), \dots, i(\tau_n))$. El recíproco se obtiene al aplicar esta implicación a la fórmula $\neg\phi$. ■

Hay una diferencia esencial entre \Vdash^* y \Vdash^M , y es que la definición de \Vdash^* involucra filtros genéricos, mientras que \Vdash^M es un término relativizado a M , por lo que sólo involucra objetos accesibles desde el modelo base, y este hecho es fundamental. Pero es fácil corregir esta diferencia:

Definición 4.46 Sea \mathbb{P} un c.p.o., sea $i : \mathbb{P} \longrightarrow R(\mathbb{P})$ la inmersión densa en su compleción, sea $p \in \mathbb{P}$ y sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{P}}$. Definimos

$$p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \equiv i(p) \leq \|\phi(i(\sigma_1), \dots, i(\sigma_n))\|.$$

Así la relación \Vdash es puramente sintáctica y no involucra en absoluto el concepto de filtro. El enunciado general del teorema fundamental afirma en particular que, sobre modelos numerables, \Vdash^* equivale a $(\Vdash)^M$:

Teorema 4.47 (Teorema fundamental de la teoría de extensiones) Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula con a lo sumo las variables libres indicadas. Sea M un modelo transitivo de ZF, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{P}}$.

a) Si M es numerable y $p \in \mathbb{P}$ entonces $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$ si y sólo si para todo filtro \mathbb{P} -genérico sobre M con $p \in G$ se cumple $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$.

b) Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M entonces

$$\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \bigvee p \in G (p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M.$$

DEMOSTRACIÓN: Consideramos la compleción $\mathbb{B} = R(\mathbb{P})^M$. La parte a) equivale a que

$$p \Vdash^* \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow (p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M.$$

En efecto, por el teorema 4.45 tenemos que

$$p \Vdash^* \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow i(p) \Vdash^* \phi(i(\sigma_1), \dots, i(\sigma_n)).$$

Por 4.44 esto equivale a que $i(p) \leq \|\phi(i(\sigma_1), \dots, i(\sigma_n))\|^M$, lo cual a su vez es, por definición, $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$.

b) Sea $H = \hat{i}(G)$ el ultrafiltro dado por 4.40, que es \mathbb{B} -genérico sobre M . Por 4.42 se cumple $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$ si y sólo si $\phi^{M[H]}(i(\sigma_1)_H, \dots, i(\sigma_n)_H)$, si y sólo si $\|\phi(i(\sigma_1), \dots, i(\sigma_n))\|^M \in H$, si y sólo si

$$\forall p \in G \ i(p) \leq \|\phi(i(\sigma_1), \dots, i(\sigma_n))\|^M,$$

si y sólo si $\forall p \in G \ (p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$. ■

Notas A partir de aquí ya no usaremos más la notación provisional \Vdash^* , pues sólo funciona correctamente sobre modelos transitivos numerables y en ellos, según el teorema fundamental, es equivalente a $(\Vdash)^M$.

Observemos que la numerabilidad del modelo en el teorema fundamental es menos relevante de lo que puede parecer, pues en el apartado b) no se requiere, ni tampoco realmente en una de las implicaciones del apartado a). En efecto, si M no es necesariamente numerable y tenemos que $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$, podemos asegurar que si G es p -genérico sobre M y $p \in G$ entonces se cumple $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$, pues eso es justamente lo que afirma el apartado b).

Lo único que no podemos garantizar si M no es numerable es que por el hecho de que $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$ se cumpla siempre que G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$ podamos asegurar que $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$, y es lógico que así sea, porque incluso podría no haber ningún filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , con lo que la hipótesis se cumpliría trivialmente para cualquier condición y cualquier fórmula.

En definitiva, lo que afirma el teorema fundamental es que alguien que “viva” en M puede reducir cualquier problema sobre si una cierta afirmación se cumple o no en $M[G]$ a si una cierta condición está o no en el filtro genérico. En el caso de extensiones respecto de álgebras de Boole completas, la mayor condición que cumple esto es $\|\phi\|^M$, pero en el caso de un c.p.o. arbitrario no podemos definir esa máxima condición y nos tenemos que limitar a demostrar que existen tales condiciones. ■

Para prescindir completamente de la definición provisional \Vdash^* observamos que el teorema 4.44 es equivalente al caso particular de la definición 4.46, cuando i es la identidad de un álgebra de Boole completa en sí misma. Entonces tenemos que, por definición

$$p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow p \leq \|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|.$$

En cuanto al teorema 4.45, que es el único resultado en el que hemos usado \Vdash^* , el teorema de reflexión nos permite generalizarlo de este modo:

Teorema 4.48 *Sea $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa entre dos c.p.o.s.*

a) *Si $\phi(x_1, \dots, x_n)$ es una fórmula absoluta para modelos transitivos de ZFC, $\tau_1, \dots, \tau_n \in V^{\mathbb{P}}$ y $p \in \mathbb{P}$, entonces*

$$p \Vdash \phi(\tau_1, \dots, \tau_n) \leftrightarrow i(p) \Vdash \phi(i(\tau_1), \dots, i(\tau_n)).$$

b) *Si i es una inmersión densa, el apartado a) vale para fórmulas cualesquiera.*

c) *Si \mathbb{P} y \mathbb{Q} son álgebras de Boole completas, entonces*

$$i(\|\phi(\tau_1, \dots, \tau_n)\|) = \|\phi(i(\tau_1), \dots, i(\tau_n))\|,$$

para fórmulas absolutas si la inmersión i es completa y para fórmulas cualesquiera si es densa (es decir, un isomorfismo).

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema de reflexión basta probar la relativización de a) y b) a un modelo transitivo numerable cualquiera de ZFC, pero, teniendo en cuenta que $(\Vdash)^M$ equivale a \Vdash^* , dicha relativización es el teorema 4.45.

Para probar c) observamos que (omitiendo los nombres en la notación) tenemos que $\|\phi\| \Vdash \phi$, luego por a) o b) también $i(\|\phi\|) \Vdash \phi$, luego $i(\|\phi\|) \leq \|\phi\|$. Igualmente, $i(\|\neg\phi\|) \leq \|\neg\phi\|$, que es lo mismo que $i(\|\phi\|)' \leq \|\phi\|'$, o también, $\|\phi\| \leq i(\|\phi\|)$. ■

Un buen ejemplo de la importancia y la utilidad del teorema fundamental lo ofrece la prueba del teorema siguiente:

Teorema 4.49 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZF (ZFC), $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces $M[G]$ es un modelo transitivo de ZF (ZFC).*

DEMOSTRACIÓN: Vamos a probar que $M[G]$ satisface el caso particular de reemplazo correspondiente a la fórmula $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n)$, donde las variables libres son exactamente las indicadas. Hemos de ver que

$$\bigwedge x_1 \dots x_n \in M[G] (\bigwedge xyz \in M[G] (\phi^{M[G]}(x, y) \wedge \phi^{M[G]}(x, z) \rightarrow y = z) \rightarrow$$

$$\bigwedge a \in M[G] \bigvee b \in M[G] \bigwedge y \in M[G] (y \in b \leftrightarrow \bigvee x \in a \phi^{M[G]}(x, y))).$$

Fijamos $\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG} \in M[G]$. Supongamos

$$\bigwedge xyz (\phi^{M[G]}(x, y) \wedge \phi^{M[G]}(x, z) \rightarrow y = z)$$

y sea $a = \sigma_G \in M[G]$. Definimos

$$b = \{y \in M[G] \mid \bigvee x \in a \phi^{M[G]}(x, y)\}.$$

Basta probar que $b \in M[G]$, para lo cual hemos de encontrarle un nombre en $M^{\mathbb{P}}$.

Observemos que si $y \in b$, entonces $y = \tau_G$, para un $\tau \in M^{\mathbb{P}}$. Sea $x \in a$ tal que $\phi^{M[G]}(x, y)$. Entonces $x = \pi_G$, con $(\pi, s) \in \sigma$ y $s \in G$. De este modo tenemos $\pi_G \in \sigma_G \wedge \phi^{M[G]}(\pi_G, \tau_G)$, luego existe una condición $p \in G$ tal que⁹ $p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \tau))$. Recíprocamente, si $p \in G$ cumple $p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \tau))$, entonces $\tau_G \in b$. En vista de esto parece razonable definir

$$\rho = \{(\tau, p) \mid \tau \in M^{\mathbb{P}} \wedge p \in \mathbb{P} \wedge \bigvee \pi \in \mathcal{D}\sigma p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \tau))\}$$

y demostrar que $b = \rho_G$. No es difícil probar que $b = \rho_G$, pero el problema es que $\rho \notin M$. Más concretamente, el conjunto ρ resulta ser “una clase propia en M ”, en el mismo sentido en que lo son, por ejemplo, Ω^M o el propio M .

Ello se debe esencialmente a que existe una clase propia de nombres τ que nombran a un mismo conjunto: para cada $y \in b$ existen “demasiados” τ tales que $(\tau, p) \in \rho$ para cierto p . Observemos que no se nos plantea el mismo problema con π porque podemos tomarlo en el dominio de σ , el cual es un conjunto en M . Vamos a hacer algo similar con τ , es decir, vamos a probar que los nombres para los $y \in b$ los podemos tomar en un cierto conjunto de nombres en M . Para ello observamos que la sentencia siguiente es un teorema de ZF:

$$\begin{aligned} \Lambda \mathbb{P} \leq \mathbb{1} \sigma \sigma_1 \cdots \sigma_n ((\mathbb{P}, \leq, \mathbb{1})) \text{ es un c.p.o. } \wedge \sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{P}} \rightarrow \\ \bigvee S (\bigwedge x \in S x \in V^{\mathbb{P}} \wedge \bigwedge \pi p \tau (\pi \in \mathcal{D}\sigma \wedge p \in \mathbb{P} \wedge \tau \in V^{\mathbb{P}} \wedge \\ p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \tau)) \rightarrow \bigvee \mu \in S p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu))). \end{aligned}$$

En efecto, para cada $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ y cada $p \in \mathbb{P}$ sea $\alpha(\pi, p)$ el mínimo ordinal α tal que existe un $\tau \in V_\alpha \cap V^{\mathbb{P}}$ de modo que $p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \tau))$ o bien $\alpha(\pi, p) = 0$ si no existe ningún τ . Entonces $\{\alpha(\pi, p) \mid \pi \in \mathcal{D}\sigma \wedge p \in \mathbb{P}\}$ es un conjunto (por ser imagen de $\mathcal{D}\sigma \times \mathbb{P}$), luego tiene supremo $\alpha \in \Omega$. Basta tomar $S = V^{\mathbb{P}} \cap V_\alpha$.

La relativización a M de la sentencia anterior nos da que existe un conjunto $S \in M$ tal que $S \subset M^{\mathbb{P}}$ y

$$\begin{aligned} \bigwedge \pi p \tau (\pi \in \mathcal{D}\sigma \wedge p \in \mathbb{P} \wedge \tau \in M^{\mathbb{P}} \wedge \\ p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \tau)) \rightarrow \bigvee \mu \in S p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu))). \end{aligned}$$

Ahora podemos definir

$$\rho = \{(\mu, p) \mid \mu \in S \wedge p \in \mathbb{P} \wedge \bigvee \pi \in \mathcal{D}\sigma p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu))\}.$$

Ahora sí que se cumple $\rho \in M^{\mathbb{P}}$. La clave está en que hay que entender que \Vdash es \Vdash^M , por lo que, en realidad,

$$\rho = \{(\mu, p) \mid \mu \in S \wedge p \in \mathbb{P} \wedge \bigvee \pi \in \mathcal{D}\sigma p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu))\}^M \in M$$

Veamos que $b = \rho_G \in M[G]$.

⁹Es costumbre escribir \Vdash en lugar de \Vdash^M , dando por hecho que la relación \Vdash se calcula en el modelo base en que trabajamos.

Si $y = \tau_G \in b$, como antes obtenemos un $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ y un $p \in G$ de modo que $p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \tau))$. Por la construcción del conjunto S existe un $\mu \in S$ tal que $p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu))$, de donde $(\mu, p) \in \rho$, y por lo tanto $\mu_G \in \rho_G$. Como $p \in G$ se cumple $\pi_G \in \sigma_G \wedge \phi^{M[G]}(\pi_G, \mu_G)$, pero también tenemos $\phi^{M[G]}(\pi_G, \tau_G)$, con lo que la hipótesis de unicidad nos da que $y = \tau_G = \mu_G \in \rho_G$.

Recíprocamente, si $y \in \rho_G$ tenemos que $y = \mu_G$ con $(\mu, p) \in \rho \wedge p \in G$. Entonces $p \Vdash (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu))$, con lo que $\pi_G \in \sigma_G \wedge \phi^{M[G]}(\pi_G, \mu_G)$, es decir, $\pi_G \in a \wedge \phi^{M[G]}(\pi_G, y)$, lo que prueba que $y \in b$.

La relativización del axioma de partes es

$$\wedge x \in M[G] \vee y \in M[G] \wedge u \in M[G] (u \in y \leftrightarrow u \subset x),$$

pero en realidad basta probar que

$$\wedge x \in M[G] \vee y \in M[G] \wedge u \in M[G] (u \subset y \rightarrow u \in x),$$

pues de aquí se deduce el axioma de partes mediante el teorema de especificación, que ya sabemos que se cumple en $M[G]$ (pues se deduce del axioma de reemplazo sin necesidad del axioma de partes).

Sea $x = \sigma_G \in M[G]$. Definimos

$$S = \{\mu \in M^{\mathbb{P}} \mid \mathcal{D}\mu \subset \mathcal{D}\sigma\} = (\mathcal{P}(\mathcal{D}\sigma \times \mathbb{P}))^M \in M.$$

El conjunto S va a desempeñar la misma función que el correspondiente conjunto en la prueba del axioma de reemplazo, sólo que esta vez ha sido más fácil obtenerlo. Sea $\rho = S \times \{\mathbf{1}\} \in M^{\mathbb{P}}$ y llamemos $y = \rho_G \in M[G]$. Vamos a ver que y cumple lo pedido. Para ello tomamos $u \in M[G]$ tal que $u \subset x$. Sea $u = \tau_G \subset \sigma_G$. No podemos asegurar que $\tau \in S$, pero vamos a ver que $\tau_G = \mu_G$ con $\mu \in S$.

Sea $\mu = \{(\pi, p) \mid \pi \in \mathcal{D}\sigma \wedge p \Vdash \pi \in \tau\} \in S$. Notemos que efectivamente $\mu \in M$, pues es un subconjunto de $\mathcal{D}\sigma \times \mathbb{P} \in M$ definible en M (teniendo en cuenta una vez más que \Vdash es \Vdash^M). Sólo falta probar que $u = \tau_G = \mu_G$.

Si $a \in \tau_G$ entonces $a = \pi_G$, con $(\pi, s) \in \tau$ y $s \in G$. Como $\pi_G \in \tau_G$ existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash \pi \in \tau$, de donde $(\pi, p) \in \mu$ y así $a = \pi_G \in \mu_G$.

Si $a \in \mu_G$, entonces $a = \pi_G$ con $(\pi, p) \in \tau$ y $p \in G$, luego $p \Vdash \pi \in \tau$ y, en consecuencia, $a = \pi_G \in \tau_G$. Así pues, $\tau_G = \mu_G$.

Supongamos finalmente que M cumple el axioma de elección y veamos que lo mismo le sucede a $M[G]$. Basta demostrar que en $M[G]$ se cumple

$$\wedge x \vee \alpha \in \Omega \forall f (f \text{ es una función } \wedge \mathcal{D}f = \alpha \wedge x \subset \mathcal{R}f),$$

pues esto implica que todo conjunto puede ser bien ordenado.

Sea $x = \sigma_G \in M$. Sean $\alpha, g \in M$ tales que $g : \alpha \longrightarrow \mathcal{D}\sigma$ biyectiva (existen en virtud del axioma de elección relativizado a M). Ahora definimos $\tau = \{\text{p.o.}(\beta, g(\beta)) \mid \beta < \alpha\} \times \mathbf{1} \in M^{\mathbb{P}}$. Claramente

$$f = \tau_G = \{(\beta, g(\beta)_G) \mid \beta < \alpha\}$$

cumple lo pedido. ■

Con esto la prueba del teorema 4.9 dada en la página 137 vale ya para fórmulas equivalentes en todo ZFC, e igualmente podemos demostrar el teorema 4.8:

DEMOSTRACIÓN (del teorema 4.8): Por el teorema de reflexión, basta probar que el teorema es cierto en todo modelo transitivo numerable de ZFC. Fijado un teorema ϕ de ZFC, consideramos la sentencia “Si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa, entonces $\|\phi\| = \mathbb{1}$ ”.

Para probarla en un modelo transitivo numerable M de ZFC suponemos que $\mathbb{B} \in M$ es un álgebra de boole completa ^{M} y tenemos que probar que $\|\phi\|^M = \mathbb{1}$. Si esto no fuera cierto, por el teorema 4.21 existiría un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M tal que $\|\phi\|' \in G$, y por el teorema fundamental se cumpliría $\neg\phi^{M[G]}$, pero por el teorema anterior tenemos que $\phi^{M[G]}$, contradicción. ■

De la propia definición de \Vdash se deduce esta versión equivalente:

Teorema 4.50 *Si \mathbb{P} es un c.p.o. y ϕ es un teorema de ZFC, entonces $\mathbb{1} \Vdash \phi$.*

El teorema siguiente recoge todo lo que hemos obtenido hasta ahora sobre las extensiones genéricas:

Teorema 4.51 (Teorema del modelo genérico) *Sea M un modelo transitivo de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M .*

- a) $M[G]$ es un modelo transitivo de ZFC.
- b) $M \subset M[G]$ y $G \in M[G]$.
- c) $\Omega^M = \Omega^{M[G]}$.
- d) Si N es un modelo transitivo de ZF tal que $M \subset N$ y $G \in N$ entonces $M[G] \subset N$.

Sólo hay que probar a) (pues no estamos suponiendo que M sea numerable). El resto es el teorema 4.32. Ahora bien, si ϕ es un axioma de ZFC (podemos suponerlo sin variables libres), por el teorema anterior tenemos que $(\mathbb{1} \Vdash \phi)^M$, y por el teorema fundamental $\phi^{M[G]}$. ■

4.5 Primeros ejemplos y aplicaciones

En este momento podemos recapitular varios argumentos que hemos presentado colateralmente en las secciones precedentes. Ya tenemos demostrada la independencia del axioma de constructibilidad, y el argumento es el siguiente:

Teorema 4.52 *Sea M un modelo transitivo de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y G un filtro genérico sobre M . Entonces*

$$\bigwedge x \in M[G] (x \text{ es constructible}^{M[G]} \leftrightarrow x \in M \wedge x \text{ es constructible}^M).$$

En particular, si M cumple $V = L$ entonces

$$\bigwedge x \in M[G] (x \text{ es constructible}^{M[G]} \leftrightarrow x \in M).$$

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema 3.9 tenemos que x es constructible M si y sólo si $x \in L$ (si M es una clase propia) o si y sólo si $x \in L_{\Omega^M}$ (si M es un conjunto), pero, como $\Omega^M = \Omega^{M[G]}$, resulta que lo mismo vale para $M[G]$, de donde se sigue inmediatamente el enunciado. ■

El teorema anterior puede abreviarse en la igualdad $L^M = L^{M[G]}$. Ahora es evidente que cualquier extensión genérica $M[G]$ respecto a un c.p.o. no atómico de un modelo M de ZFC es un modelo de $ZFC+V \neq L$, luego el axioma de constructibilidad no puede probarse en ZFC (salvo que éste sea contradictorio, claro).

Ejemplo Un ejemplo de c.p.o. no atómico es el c.p.o. \mathbb{P} que considerábamos al principio de la sección 4.3. Según hemos visto, a partir de un filtro genérico G podíamos construir una función genérica $f = \bigcup G : \omega \longrightarrow 2$ y a partir de ésta un conjunto $a = f^{-1}[\{1\}] \subset \omega$. Es claro que $a \in M[G] \setminus M$, pues si a estuviera en M también estaría f y por lo tanto G . La conclusión es que no sólo es consistente que $V \neq L$, sino, más concretamente, que existe un subconjunto de ω no constructible. ■

Veamos ahora cómo eligiendo adecuadamente un c.p.o. podemos conseguir extensiones genéricas con propiedades deseadas:

Teorema 4.53 *Si ZFC es consistente también lo es ZFC+ $\aleph_1^L < \aleph_1$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC + $V = L$ y sea

$$\mathbb{P} = \{p \subset \omega \times \omega_1 \mid p \text{ es una función finita}\}^M.$$

Notemos en la definición de \mathbb{P} todo es absoluto excepto ω_1 , de modo que \mathbb{P} está formado por las funciones de un subconjunto finito de ω en ω_1^M . Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , resulta que $f = \bigcup G : \omega \longrightarrow \omega_1^M$ suprayectiva. En efecto, f es una función porque las condiciones de G son compatibles dos a dos. Su dominio es todo ω porque, dado $n \in \omega$, el conjunto

$$D_n = \{p \in \mathbb{P} \mid n \in \mathcal{D}_p\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} , y f es suprayectiva porque, para todo $\alpha \in \omega_1^M$, el conjunto

$$E_\alpha = \{p \in \mathbb{P} \mid \alpha \in \mathcal{R}_p\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} .

Como $G \in M[G]$, es claro que $f \in M[G]$, luego ω_1^M es numerable $^{M[G]}$. Ahora basta observar que $\omega_1^M = (\omega_1^L)^{M[G]}$, pues entonces lo que tenemos es que $(\omega_1^L$ es numerable) $^{M[G]}$.

En efecto, basta tener en cuenta que $\bigwedge x \in M[G] ((x \in L)^{M[G]} \leftrightarrow x \in M)$. Como en ZFC se demuestra que

$$\neg \forall f \in L (f : \omega \longrightarrow \omega_1^L \text{ biyectiva}) \wedge \bigwedge \beta < \omega_1^L \forall f \in L f : \omega \longrightarrow \beta \text{ biyectiva},$$

al relativizar a $M[G]$ obtenemos

$$\neg \forall f \in M(f : \omega \longrightarrow (\omega_1^L)^{M[G]} \text{ biyectiva}) \wedge \\ \wedge \beta < (\omega_1^L)^{M[G]} \forall f \in M f : \omega \longrightarrow \beta \text{ biyectiva}),$$

pero lo mismo vale cambiando $(\omega_1^L)^{M[G]}$ por ω_1^M , luego $\omega_1^M = (\omega_1^L)^{M[G]}$. ■

Observación Acabamos de probar que \aleph_1^L puede ser un ordinal numerable. Notemos que, puesto que $(|\mathcal{P}\omega| = \aleph_1)^L$, existe una biyección $f : (\mathcal{P}\omega)^L \longrightarrow \aleph_1^L$, luego si \aleph_1^L es numerable, también es numerable $(\mathcal{P}\omega)^L$. Así pues, acabamos de probar que es consistente que sólo existan \aleph_0 subconjuntos constructibles de ω .

Esto es interesante porque uno podría pensar ingenuamente que la prueba de la consistencia de la hipótesis del continuo consiste en demostrar que, aunque el cardinal de $\mathcal{P}\omega$ pueda ser grande, sólo hay \aleph_1 subconjuntos constructibles de ω , de modo que al restringirnos a L “dejamos de ver” otros posibles subconjuntos de ω y sólo vemos los \aleph_1 que son constructibles. Ahora vemos que esto no es exacto, ya que, si al restringirnos a L vemos \aleph_1 subconjuntos de ω , esto puede deberse ciertamente a que realmente haya \aleph_1 subconjuntos constructibles de ω , pero también a que sólo haya \aleph_0 de ellos, pero que las biyecciones entre $(\mathcal{P}\omega)^L$ y ω no sean constructibles, de modo que al restringirnos a L no sólo dejamos de ver los subconjuntos no constructibles de ω , sino también las biyecciones que numeran los subconjuntos constructibles. ■

Extensiones de L Si M es un modelo transitivo de ZFC + $V = L$, \mathbb{P} es un c.p.o. en M y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces $L^{M[G]} = M$, por lo que en $M[G]$ se cumple que $\mathbb{P} \in L$, y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre L y $V = L[G]$, en el sentido de que todo elemento de V es de la forma σ_G con $\sigma \in L^\mathbb{P}$. Más brevemente, en $M[G]$ se cumple que la clase universal es una extensión genérica de la clase L .

Por otra parte, si consideramos $L[G]^{M[G]}$ en el sentido de 3.5, sabemos que es un modelo transitivo de ZFC tal que $M = L^{M[G]} \subset L[G]^{M[G]}$, y además $G \in L[G]^{M[G]}$, porque $\mathbb{P} \in L^{M[G]} \subset L[G]^{M[G]}$, luego existe un $\alpha \in \Omega^M$ tal que $P \in L_\alpha[G]^{M[G]}$, luego $G \subset \mathbb{P} \subset L_\alpha[G]^{M[G]}$, luego $G \in L_{\alpha+1}[G]^{M[G]} \subset L[G]^{M[G]}$. Por el teorema del modelo genérico concluimos que $L[G]^{M[G]} = M[G]$, de modo que $(V = L[G])^{M[G]}$ en el sentido de 3.5.

Así pues, aunque sólo hemos demostrado la existencia de filtros genéricos sobre modelos numerables, cada vez que consideramos un modelo transitivo numerable de ZFC + $V = L$ y consideramos la relativización a M de la definición de un c.p.o., por ejemplo,

$$\mathbb{P} = \{p \subset \omega \times \omega_1 \mid p \text{ es una función finita}\}^M,$$

al tomar un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y considerar la extensión $M[G]$ estamos obteniendo un modelo que prueba la consistencia de que exista un filtro \mathbb{P} -genérico sobre L , donde ahora

$$\mathbb{P} = \{p \subset \omega \times \omega_1 \mid p \text{ es una función finita}\}^L.$$

Por ello, en lugar de considerar una extensión genérica sobre un modelo numerable apoyándonos en el teorema que prueba la existencia de filtros genéricos, un enfoque alternativo es considerar una extensión genérica sobre L apoyándonos en que, si ZFC es consistente, podemos probar que también lo es que existe un filtro \mathbb{P} -genérico sobre L (precisamente considerando una extensión genérica sobre un modelo numerable). ■

Extensiones de la clase universal Más sencillamente, a la hora de estudiar la relación entre M y $M[G]$ (siendo, en principio, M un modelo numerable), hay quienes prefieren “meterse en la piel” de alguien que “viva” en M y llaman V a M y $V[G]$ a $M[G]$. Esto supone considerar una “extensión genérica de la clase universal”, lo cual literalmente sería un sinsentido, pero en la práctica sólo consiste en el convenio (totalmente inocuo y coherente) de escribir ϕ cuando habría que escribir ϕ^M y escribir $\phi^{V[G]}$ cuando habría que escribir $\phi^{M[G]}$.

Formalmente supone una simplificación, pues en lugar de trabajar con tres modelos: M , $M[G]$ y V , sin más que comprometerse uno a no salirse nunca de $M[G]$ (lo cual no supone ningún inconveniente en la práctica) se elimina uno de ellos y se trabaja únicamente con dos. Además, al identificar M con V , se omiten las relativizaciones al modelo base, lo que supone una simplificación formal añadida. ■

4.6 Hechos adicionales

Recogemos en esta última sección algunos resultados adicionales de carácter más técnico que a menudo resultan útiles y complementan la teoría básica de las extensiones genéricas.

C.p.o.s casi homogéneos Empezaremos demostrando algo que hemos adelantado en varias ocasiones: en la mayoría de los casos, el valor booleano de una sentencia sólo puede ser Φ o $\mathbf{1}$. Vamos a plantear un enunciado equivalente válido para c.p.o.s arbitrarios y daremos una condición suficiente para que a un c.p.o. \mathbb{P} le suceda esto.

Definición 4.54 Un *automorfismo* de un c.p.o. \mathbb{P} es una semejanza $f : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{P}$ tal que $f(\mathbf{1}) = \mathbf{1}$ (la última condición es redundante si \mathbb{P} está parcialmente ordenado). Llamaremos $\text{Aut } \mathbb{P}$ al conjunto de todos los automorfismos de \mathbb{P} .

Si $f \in \text{Aut } \mathbb{P}$ en 4.41 hemos definido la biyección $\bar{f} : V^\mathbb{P} \rightarrow V^\mathbb{P}$. Si $\mathbf{1}$ es la identidad en \mathbb{P} se cumple que $\bar{\mathbf{1}}$ es la identidad en $V^\mathbb{P}$. Además $\overline{f \circ g} = \bar{f} \circ \bar{g}$, de donde a su vez se sigue que $\overline{f^{-1}} = \bar{f}^{-1}$.

Si M es un modelo transitivo numerable de ZFC y $\mathbb{P} \in M$, es claro que $\text{Aut}^M \mathbb{P} = \text{Aut } \mathbb{P} \cap M$ y cada $f \in \text{Aut}^M \mathbb{P}$ determina $\bar{f} : M^\mathbb{P} \rightarrow M^\mathbb{P}$ biyectiva, que no es sino la restricción de la biyección correspondiente en $V^\mathbb{P}$.

Por 4.48, para toda fórmula $\phi(x_1, \dots, x_n)$, todos los $\tau_1, \dots, \tau_n \in M^\mathbb{P}$ y todo $p \in \mathbb{P}$ se cumple

$$p \Vdash \phi(\tau_1, \dots, \tau_n) \leftrightarrow f(p) \Vdash \phi(\bar{f}(\tau_1), \dots, \bar{f}(\tau_n)).$$

Por último, una simple inducción prueba que $\bigwedge f \in \text{Aut } \mathbb{P} \bigwedge x f(\check{x}) = \check{x}$.

En lo sucesivo omitiremos las barras sobre las aplicaciones inducidas por automorfismos. Ahora ya podemos definir la condición sobre \mathbb{P} que estábamos buscando:

Definición 4.55 Diremos que un c.p.o. \mathbb{P} es *casi homogéneo* si

$$\bigwedge pq \in \mathbb{P} \bigvee f \in \text{Aut } \mathbb{P} \neg f(p) \perp q.$$

Según indicábamos, esta propiedad la tendrán en la práctica todos los c.p.o.s con los que vamos a trabajar. El resultado principal es el siguiente:

Teorema 4.56 \mathbb{P} un c.p.o. casi homogéneo, sea $p \in \mathbb{P}$, sean x_1, \dots, x_n conjuntos cualesquiera y sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula (metamatemática). Entonces

$$p \Vdash \phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n) \leftrightarrow \mathbb{1} \Vdash \phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n).$$

En particular $\mathbb{1} \Vdash \phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n)$ o bien $\mathbb{1} \Vdash \neg\phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n)$.

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema de reflexión basta probar que el resultado es cierto en cualquier modelo transitivo numerable M . Tenemos entonces que $\mathbb{P} \in M$ es casi homogéneo M y que $x_1, \dots, x_n \in M$.

Supongamos que $p \Vdash \phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n)$ pero que $\neg\mathbb{1} \Vdash \phi$. Entonces existe un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $\neg\phi^{M[G]}(x_1, \dots, x_n)$, luego existe $q \in G$ tal que $q \Vdash \neg\phi$. Sea $f \in \text{Aut}^M \mathbb{P}$ tal que $\neg f(p) \perp q$. Sea $r \in \mathbb{P}$ tal que $r \leq f(p) \wedge r \leq q$. Como $f(p) \Vdash \phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n)$, también $r \Vdash \phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n)$, pero como $r \leq q$, también $r \Vdash \neg\phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n)$, contradicción. ■

Por lo tanto, si M es un modelo transitivo numerable de ZFC y $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. casi homogéneo M , todas las extensiones genéricas $M[G]$ cumplen las mismas sentencias, indistintamente del filtro G con que se construyan.

En el caso de álgebras de Boole completas esto se traduce inmediatamente que si \mathbb{B} es casi homogénea (lo que equivale a que \mathbb{B} tenga un c.p.o. denso casi homogéneo) entonces, para toda fórmula $\phi(x_1, \dots, x_n)$ se cumple que

$$\|\phi(\check{x}_1, \dots, \check{x}_n)\| = \mathbb{O}, \mathbb{1},$$

como habíamos afirmado.

C.p.o.s separativos Recordemos de [TC 10.15] la definición de c.p.o. separativo:

Un c.p.o. \mathbb{P} es *separativo* si $\bigwedge pq \in \mathbb{P}(p \not\leq q \rightarrow \bigvee r \in \mathbb{P}(r \leq p \wedge r \perp q))$.

El teorema [TC 10.16] prueba que las inmersiones entre c.p.o.s separativos son inyectivas. Por el contrario, incluso una inmersión densa cuyo conjunto inicial no sea separativo puede identificar condiciones distintas. Es inmediato que toda álgebra de Boole es separativa, luego, como todo c.p.o. puede sumergirse densamente en un álgebra de Boole completa, en particular puede sumergirse densamente en un c.p.o. separativo. Probamos ahora que si sólo exigimos la separatividad, la inmersión puede tomarse suprayectiva:

Teorema 4.57 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. Entonces existe un conjunto parcialmente ordenado separativo \mathbb{Q} y una inmersión suprayectiva (luego densa) $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$. Además \mathbb{Q} es único salvo semejanza.*

DEMOSTRACIÓN: Sea R la relación de equivalencia en \mathbb{P} dada por

$$p R q \leftrightarrow \bigwedge r \in \mathbb{P} (r \perp p \leftrightarrow r \perp q).$$

Sea $\mathbb{Q} = \mathbb{P}/R$ el conjunto cociente y en él consideramos el orden dado por

$$[p] \leq [q] \leftrightarrow \bigwedge r \in \mathbb{P} (r \leq p \rightarrow \neg r \perp q).$$

Está bien definido, pues si $[p] = [p']$ y $[q] = [q']$ y $[p] \leq [q]$, entonces $[p'] \leq [q']$. En efecto, si $r \in \mathbb{P}$ cumple $r \leq p'$, entonces $\neg r \perp p'$, luego $\neg r \perp p$. Existe $s \in \mathbb{P}$ tal que $s \leq r \wedge s \leq p$. Como $[p] \leq [q]$, ha de ser $\neg s \perp q$, luego existe $t \in \mathbb{P}$ tal que $t \leq s \wedge t \leq q$. Así $t \leq r \wedge t \leq q$, es decir, $\neg r \perp q$, luego también $\neg r \perp q'$. Esto prueba que $[p'] \leq [q']$.

La relación en \mathbb{Q} es claramente reflexiva. Veamos que es simétrica, para lo cual suponemos que $[p] \leq [q] \wedge [q] \leq [p]$. Si $\neg r \perp p$, existe $s \in \mathbb{P}$ tal que $s \leq r \wedge s \leq p$, luego $s \leq r \wedge \neg s \perp q$. Existe $t \in \mathbb{P}$ tal que $t \leq s \leq r \wedge t \leq q$. Por consiguiente $\neg r \perp q$. Igualmente se prueba el recíproco, luego $[p] = [q]$.

Para probar la transitividad suponemos $[p] \leq [q] \wedge [q] \leq [r]$. Si $u \leq p$ entonces $\neg u \perp q$ (porque $[p] \leq [q]$). Existe $v \in \mathbb{P}$ tal que $v \leq u \wedge v \leq q$. Entonces $\neg v \perp r$ (porque $[q] \leq [r]$). Existe $w \in \mathbb{P}$ tal que $w \leq v \leq u \wedge w \leq r$. Así pues, $\neg u \perp r$, lo que prueba que $[p] \leq [r]$.

Tenemos, por lo tanto, que \mathbb{Q} es un conjunto parcialmente ordenado (con máximo $[1]$). Sea $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ la aplicación dada por $i(p) = [p]$. Obviamente es suprayectiva y $\bigwedge pp' \in \mathbb{P} (p \leq p' \rightarrow i(p) \leq i(p'))$. Para probar que es una inmersión suponemos que $\neg i(p) \perp i(p')$ y hemos de probar que $\neg p \perp p'$. Existe $r \in \mathbb{P}$ tal que $[r] \leq [p] \wedge [r] \leq [p']$. De $[r] \leq [p]$ se sigue en particular que $\neg r \perp p$, luego existe $s \in \mathbb{P}$ tal que $s \leq r \wedge s \leq p$. Entonces $[r] \leq [p']$ implica que $\neg s \perp p'$. Existe $t \in \mathbb{P}$ tal que $t \leq s \leq p \wedge t \leq p'$. Así, ciertamente, $\neg p \perp p'$.

Veamos ahora que \mathbb{Q} es separativo. Si $[p] \not\leq [q]$ esto significa que existe $r \in \mathbb{P}$ tal que $r \leq p \wedge r \perp q$. Como i es una inmersión $[r] \leq [p] \wedge [r] \perp [q]$, luego tenemos que $\bigvee r \in \mathbb{Q} (r \leq [p] \wedge r \perp [q])$.

Falta probar la unicidad de \mathbb{Q} . Para ello supongamos que \mathbb{Q}' es otro conjunto parcialmente ordenado separativo tal que existe $j : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}'$ inmersión suprayectiva.

Veamos que si $r, s \in \mathbb{Q}'$ se cumple $r \leq s \leftrightarrow \bigwedge t \in \mathbb{Q}' (\neg t \perp r \rightarrow \neg t \perp s)$.

Si $r \leq s \wedge \neg t \perp r$, entonces existe $u \in \mathbb{Q}'$ tal que $u \leq t \wedge u \leq r \leq s$, luego $\neg t \perp s$. Recíprocamente, si $r \not\leq s$, existe un $t \in \mathbb{Q}'$ tal que $t \leq r \wedge t \perp s$ (porque \mathbb{Q}' es separativo), luego $\neg t \perp r$ pero $t \perp s$.

Como esto vale para todo conjunto parcialmente ordenado separativo, en particular vale para \mathbb{Q} . Dados $p, q \in \mathbb{P}$, se cumple

$$i(p) \perp i(q) \leftrightarrow p \perp q \leftrightarrow j(p) \perp j(q).$$

En consecuencia

$$\begin{aligned} i(p) \leq i(q) &\leftrightarrow \bigwedge r \in \mathbb{P} (\neg i(r) \perp i(p) \rightarrow \neg i(r) \perp i(q)) \\ &\leftrightarrow \bigwedge r \in \mathbb{P} (\neg j(r) \perp j(p) \rightarrow \neg j(r) \perp j(q)) \leftrightarrow j(p) \leq j(q). \end{aligned}$$

Como las relaciones en \mathbb{Q} y \mathbb{Q}' son antisimétricas, esto implica que

$$i(p) = i(q) \leftrightarrow j(p) = j(q).$$

De aquí se sigue que la aplicación $f : \mathbb{Q} \longrightarrow \mathbb{Q}'$ dada por $f(i(p)) = j(p)$ está bien definida y es una semejanza. ■

Observemos que, en las condiciones del teorema anterior, las compleciones de \mathbb{P} y \mathbb{Q} son semejantes, luego \mathbb{Q} es semejante a la imagen de \mathbb{P} en su compleción. Por lo tanto, la construcción de \mathbb{Q} nos muestra en particular la condición necesaria y suficiente para que dos elementos de \mathbb{P} tengan la misma imagen en su compleción, a saber, que tengan los mismos elementos incompatibles.

Un resultado elemental Enunciamos este simple teorema para referencias posteriores:

Teorema 4.58 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZF, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Sea $f : A \longrightarrow M$ tal que $f \in M[G]$. Entonces existe un $B \in M$ tal que $f : A \longrightarrow B$.*

DEMOSTRACIÓN: Claramente existe un ordinal $\alpha \in M[G]$ tal que

$$f : A \longrightarrow V_\alpha^{M[G]} \cap M = V_\alpha^M = B. \quad \blacksquare$$

Propiedades de la relación \Vdash Veamos una serie de propiedades que resultan útiles a la hora de trabajar con la relación \Vdash :

Teorema 4.59 *Sean ϕ y ψ fórmulas cuyas variables libres estén a lo sumo entre $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ salvo que se indique alguna más, sea \mathbb{P} un c.p.o., sean $p, q \in \mathbb{P}$ y sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^\mathbb{P}$. Entonces:*

- a) $\neg(p \Vdash \phi \wedge p \Vdash \neg\phi)$,
- b) $p \Vdash \phi \wedge q \leq p \rightarrow q \Vdash \phi$,
- c) $\neg p \Vdash \phi \leftrightarrow \bigvee q \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge q \Vdash \neg\phi)$,
- d) $p \Vdash \neg\phi \leftrightarrow \neg \bigvee q \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge q \Vdash \phi)$,
- e) $\{p \in \mathbb{P} \mid p \Vdash \phi \vee p \Vdash \neg\phi\}$ es denso en \mathbb{P} ,
- f) $p \Vdash \phi \wedge \psi \leftrightarrow p \Vdash \phi \wedge p \Vdash \psi$,
- g) $p \Vdash \bigwedge x \phi(x) \leftrightarrow \bigwedge \sigma \in M^\mathbb{P} p \Vdash \phi(\sigma)$,

- h) $p \Vdash \forall x \phi(x) \leftrightarrow \bigwedge q \in \mathbb{P} (q \leq p \rightarrow \forall r \in \mathbb{P} \forall \sigma \in M^\mathbb{P} (r \leq q \wedge r \Vdash \phi(\sigma)))$,
i) $p \Vdash \forall x \in \sigma \phi(x) \rightarrow \forall q \in \mathbb{P} \forall \pi \in \mathcal{D}\sigma (q \leq p \wedge q \Vdash \phi(\pi))$.

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema de reflexión basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M arbitrario de ZFC. Así pues, suponemos que $\mathbb{P} \in M$ y que $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^\mathbb{P}$.

a) Si $p \Vdash \phi \wedge p \Vdash \neg\phi$, tomando un filtro genérico G llegaríamos a que $\phi^{M[G]} \wedge \neg\phi^{M[G]}$, contradicción.

b) Si $p \Vdash \phi \wedge q \leq p$, tomamos un filtro genérico G que contenga a q , con lo que también $p \in G$, luego $\phi^{M[G]}$. Esto prueba que $q \Vdash \phi$.

c) Si $\neg p \Vdash \phi$ entonces existe un filtro genérico G tal que $p \in G$ pero $\neg\phi^{M[G]}$. Por el teorema fundamental existe $r \in G$ tal que $r \Vdash \neg\phi$. Sea $q \in G$ tal que $q \leq p \wedge q \leq r$. De este modo $q \leq p \wedge q \Vdash \neg\phi$. El recíproco es trivial por a) y b).

d) Si $p \Vdash \neg\phi$ y existiera un $q \leq p$ tal que $q \Vdash \phi$ entonces $p \Vdash \phi \wedge p \Vdash \neg\phi$, contradicción.

Si $\neg p \Vdash \neg\phi$ entonces existe un $q \leq p$ tal que $q \Vdash \neg\neg\phi$, lo que claramente implica $q \Vdash \phi$, contradicción.

e) es inmediato por c).

f) Si $p \Vdash \phi \wedge \psi$ y G es un filtro genérico que contenga a p , entonces tenemos $\phi^{M[G]} \wedge \psi^{M[G]}$. Esto prueba que $p \Vdash \phi \wedge p \Vdash \psi$. El recíproco es idéntico.

g) Si $p \Vdash \bigwedge x \phi(x)$ y $\sigma \in M^\mathbb{P}$, sea G un filtro genérico que contenga a p . Entonces $\phi^{M[G]}(\sigma_G)$, luego $p \Vdash \phi(\sigma)$.

Recíprocamente, si G es un filtro genérico que contenga a G , para todo $x \in M[G]$ tenemos que $x = \sigma_G$, para cierto $\sigma \in M^\mathbb{P}$. Por hipótesis $p \Vdash \phi(\sigma)$, luego $\phi^{M[G]}(\sigma_G)$. Esto prueba $(\bigwedge x \phi(x))^{M[G]}$, luego $p \Vdash \bigwedge x \phi(x)$.

h) Si $p \Vdash \forall x \phi(x)$ y $q \in \mathbb{P}$ cumple $q \leq p$, tomemos un filtro genérico G que contenga a q . Entonces $p \in G$, luego existe un $x \in M[G]$ tal que $\phi^{M[G]}(x)$. Digamos que $x = \sigma_G$, con $\sigma \in M^\mathbb{P}$. Existe un $s \in G$ tal que $s \Vdash \phi(\sigma)$ y tomando $r \in G$ tal que $r \leq q \wedge r \leq s$ tenemos $r \leq q \wedge r \Vdash \phi(\sigma)$.

Recíprocamente, si se cumple $\neg p \Vdash \forall x \phi(x)$, existe una condición $q \leq p$ tal que $q \Vdash \bigwedge x \neg\phi(x)$. Por hipótesis existe $r \leq q$ y existe $\sigma \in M^\mathbb{P}$ de modo que $r \Vdash \phi(\sigma)$. Si G es un filtro genérico que contenga a r , también $q \in \mathbb{P}$ con lo que tenemos $\bigwedge x \in M[G] \neg\phi^{M[G]}(x)$ y también $\phi^{M[G]}(\sigma_G)$, contradicción.

i) Si $p \Vdash \forall x \in \sigma \phi(x)$, sea G un filtro genérico que contenga a p . Entonces existe $x \in \sigma_G$ tal que $\phi(x)$. Concretamente, $x = \pi_G$, donde $(\pi, r) \in \sigma$, $r \in G$. Existe $q \in G$, (y lo podemos tomar $q \leq p$) tal que $q \Vdash \phi(\pi)$. ■

Si comparamos los apartados g) y h) del teorema anterior observamos una clara asimetría. De acuerdo con g), cabría esperar que h) fuera

$$p \Vdash \forall x \phi(x) \leftrightarrow \bigvee \sigma \in M^\mathbb{P} p \Vdash \phi(\sigma).$$

La conjetura es cierta, pero no es evidente. Necesitaremos el resultado siguiente:

Teorema 4.60 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC tal que en M se cumpla: \mathbb{P} es un c.p.o., A es una anticadena¹⁰ en \mathbb{P} y $\{\sigma_q\}_{q \in A}$ es una familia de \mathbb{P} -nombres. Entonces existe un $\pi \in M^\mathbb{P}$ tal que $q \Vdash \pi = \sigma_q$ para todo $q \in A$.*

DEMOSTRACIÓN: Notemos que $\{\sigma_q\}_{q \in A}$ es una función $f : A \rightarrow M^\mathbb{P}$, de modo que $\sigma_q = f(q)$. No hay que confundir la función f con su rango, es decir, con el conjunto $\{\sigma_q \mid q \in A\}$. La hipótesis es que $f \in M$, no sólo que $\{\sigma_q \mid q \in A\} \subset M$ o que $\{\sigma_q \mid q \in A\} \in M$. Definimos

$$\pi = \bigcup_{q \in A} \{(\tau, r) \mid \tau \in \mathcal{D}\sigma_q \wedge r \in \mathbb{P} \wedge r \leq q \wedge r \Vdash \tau \in \sigma_q\} \in M^\mathbb{P}.$$

Sea $q \in A$ y veamos que $q \Vdash \pi = \sigma_q$. Tomamos un filtro genérico G tal que $q \in G$ y hemos de ver que $\pi_G = \sigma_{qG}$.

Si $a \in \pi_G$, entonces $a = \tau_G$, con $(\tau, r) \in \pi \wedge r \in G$. Por definición de π existe $q' \in A$ tal que $r \leq q' \wedge \tau \in \mathcal{D}\sigma_{q'} \wedge r \Vdash \tau \in \sigma_{q'}$. Como $r \in G$, también $q' \in G$. Tenemos que q y q' están en A y en G , pero A es una anticadena, luego ha de ser $q = q'$. Por lo tanto $r \Vdash \tau \in \sigma_q$ y así $a = \tau_G \in \sigma_{qG}$.

Recíprocamente, si $a \in \sigma_{qG}$ entonces $a = \tau_G$ con $\tau \in \mathcal{D}\sigma_q$. Tenemos que $\tau_G \in \sigma_{qG}$, luego existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash \tau \in \sigma_G$. Sea $r \in G$ tal que $r \leq p \wedge r \leq q$. Entonces $r \Vdash \tau \in \sigma_q$, luego $(\tau, r) \in \pi$ y $a = \tau_G \in \pi_G$. Esto nos da la otra inclusión. ■

Ahora ya podemos probar la versión simplificada de 4.59 h):

Teorema 4.61 *Sea $\phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n)$ una fórmula cuyas variables libres estén entre las indicadas. Sea \mathbb{P} un c.p.o., $p \in \mathbb{P}$ y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^\mathbb{P}$. Entonces*

$$p \Vdash \forall x \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow \forall \sigma \in V^\mathbb{P} p \Vdash \phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n).$$

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema de reflexión basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable de ZFC arbitrario. Suponemos, pues, que $\mathbb{P} \in M$ y que $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^\mathbb{P}$.

Si $\forall \sigma \in M^\mathbb{P} p \Vdash \phi(\sigma)$, dado un filtro genérico G tal que $p \in M$, se cumple $\phi^{M[G]}(\sigma_G)$, luego $\forall x \in M[G] \phi(x)$. Así pues, $p \Vdash \forall x \phi(x)$.

Supongamos ahora que $p \Vdash \forall x \phi(x)$. Por el lema de Zorn en M existe un conjunto $A \in M$ tal que:

- a) A es una anticadena en \mathbb{P} ,
- b) $\bigwedge q \in A (q \leq p \wedge \forall \sigma \in M^\mathbb{P} q \Vdash \phi(\sigma))$,
- c) A es maximal respecto a a) y b), es decir, no existe ningún B (en M) que cumpla a) y b) y que contenga estrictamente a A .

¹⁰Una anticadena en un c.p.o. es un conjunto de condiciones incompatibles dos a dos.

Por el axioma de elección en M podemos construir una familia $\{\sigma_q\}_{q \in A} \in M$ tal que $\bigwedge q \in A (\sigma_q \in M^{\mathbb{P}} \wedge q \Vdash \phi(\sigma_q))$. Por el teorema anterior existe $\sigma \in M^{\mathbb{P}}$ tal que $\bigwedge q \in A q \Vdash \sigma = \sigma_q$. Así, si $q \in A$ tenemos que $q \Vdash \phi(\sigma_q) \wedge \sigma = \sigma_q$, luego $q \Vdash \phi(\sigma)$.

Veamos que $p \Vdash \phi(\sigma)$. En caso contrario existe un $r \leq p$ tal que $r \Vdash \neg\phi(\sigma)$. Como estamos suponiendo que $p \Vdash \forall x \phi(x)$, por 4.59 existen $q' \leq r$ y $\pi \in M^{\mathbb{P}}$ tales que $q' \Vdash \phi(\pi)$.

Si $q \in A$ tenemos que $q \Vdash \phi(\sigma)$ y $q' \Vdash \neg\phi(\sigma)$ (pues $q' \leq r$), de donde $q \perp q'$ (una extensión común forzaría a la vez $\phi(\sigma)$ y $\neg\phi(\sigma)$). Por lo tanto $q' \notin A$ y el conjunto $A \cup \{q'\}$ contiene estrictamente a A y cumple las condiciones a) y b), contradicción. ■

El teorema anterior admite un refinamiento. Lo enunciamos en términos de álgebras de Boole porque es más cómodo manipular valores booleanos:

Teorema 4.62 $\phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n)$ una fórmula cuyas variables libres estén entre las indicadas. Sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{B}}$. Entonces existe $\sigma \in V^{\mathbb{B}}$ tal que $\|\forall x \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\| = \|\phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n)\|$.

DEMOSTRACIÓN: Como la fórmula siguiente es un teorema lógico:

$$\forall y \bigwedge x (\phi(x) \rightarrow \phi(y)),$$

su valor booleano es $\mathbf{1}$, luego por el teorema anterior existe un $\sigma \in V^{\mathbb{B}}$ tal que $\|\bigwedge x (\phi(x) \rightarrow \phi(\sigma))\| = \mathbf{1}$. Por otra parte,

$$\bigwedge y (\forall x \phi(x) \wedge \bigwedge x (\phi(x) \rightarrow \phi(y)) \rightarrow \phi(y))$$

es un teorema lógico, luego

$$\|\bigwedge y (\forall x \phi(x) \wedge \bigwedge x (\phi(x) \rightarrow \phi(y)) \rightarrow \phi(y))\| = \mathbf{1},$$

luego también $\|\forall x \phi(x) \wedge \bigwedge x (\phi(x) \rightarrow \phi(\sigma)) \rightarrow \phi(\sigma)\| = \mathbf{1}$, luego

$$\|\forall x \phi(x)\| = \|\forall x \phi(x)\| \wedge \|\bigwedge x (\phi(x) \rightarrow \phi(\sigma))\| \leq \|\phi(\sigma)\| \leq \|\forall x \phi(x)\|. \blacksquare$$

Ejercicio: Enunciar el teorema anterior para c.p.o.s cualesquiera y deducirlo del caso booleano.

Definibilidad del modelo base Veamos ahora que podemos extender ligeramente el teorema fundamental:

Definición 4.63 Si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa y $\sigma \in V^{\mathbb{B}}$, definimos

$$\|\sigma \in \check{V}\| \equiv \bigvee_{x \in V} \|\sigma = \check{x}\|.$$

Notemos que, aunque V sea una clase propia, el supremo es el supremo de un subconjunto de \mathbb{B} .

Notemos que no hemos definido \check{V} , sino simplemente un término que representamos por $\|\sigma \in \check{V}\|$. Si M es un modelo transitivo de ZFC, la relativización de $\|\sigma \in \check{V}\|$ a M la representaremos por

$$\|\sigma \in \check{M}\| = \bigvee_{x \in M} \|\sigma = \check{x}\|.$$

Teorema 4.64 *Sea M un modelo transitivo de ZF, sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa M , sean $\sigma \in M^\mathbb{B}$ y sea G un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M . Entonces*

$$\|\sigma \in \check{M}\| \in G \leftrightarrow \sigma_G \in M.$$

DEMOSTRACIÓN: Tenemos que $\|\sigma \in \check{M}\| \in G$ si y sólo si existe un $x \in M$ tal que $\|\sigma = \check{x}\| \in G$ si y sólo si existe un $x \in M$ tal que $\sigma_G = x$, si y sólo si $\sigma_G \in M$. ■

Consideremos el lenguaje \mathcal{L}_{tc}^+ que resulta de añadir al lenguaje de la teoría de conjuntos un relator monádico que representamos por $x \in V$. Añadiendo 4.63 al apartado a) de la definición 4.5 tenemos definido el valor booleano $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|$ para toda fórmula (en principio sin descriptores) de \mathcal{L}_{tc}^+ , y añadiendo el teorema anterior al principio de la prueba del teorema fundamental 4.13 resulta que éste es válido para fórmulas de \mathcal{L}_{tc}^+ , entendiendo que el relator $x \in V$ se interpreta en $M[G]$ como la pertenencia a M .

A partir de aquí se puede extender el teorema fundamental para fórmulas de \mathcal{L}_{tc}^+ con descriptores y a su vez podemos definir $p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ para fórmulas de \mathcal{L}_{tc}^+ y podemos demostrar la versión 4.47 del teorema fundamental, todo ello sin el más mínimo cambio en las demostraciones.

En la práctica, esto significa que en las expresiones $p \Vdash \phi$ o $\|\phi\|$ podemos incluir un falso “nombre canónico” \check{V} (o \check{M} cuando trabajamos en un modelo M) para exigir que un nombre represente a un objeto del modelo base.

Adjunciones de conjuntos al modelo base Terminamos con un resultado en el que trabajar con álgebras de Boole simplifica notablemente la prueba.

En general, si M es un modelo transitivo de ZFC y $A \subset M$, no es necesariamente cierto que exista un mínimo modelo $M[A]$ de ZFC tal que $M \subset M[A]$ y $A \in M[A]$, pero esto sí que es cierto si A está en una extensión genérica de M :

Teorema 4.65 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y $A \in M[G]$ tal que $A \subset M$. Entonces existe un modelo transitivo numerable de ZFC al que llamaremos $M[A]$ tal que $M \subset M[A] \subset M[G]$, $\Omega^M = \Omega^{M[A]}$ y que está caracterizado por que si N es un modelo transitivo de ZF tal que $M \subset N$ y $A \in N$ entonces $M[A] \subset N$.*

DEMOSTRACIÓN: No perdemos generalidad si suponemos que \mathbb{P} es un álgebra de Boole completa M \mathbb{B} . Sea $A = \sigma_G$, con $\sigma \in M^\mathbb{B}$. Sea $C \in M$ tal que $A \subset C$ (basta tomar $C = V_\alpha \cap M$, donde $\alpha = \text{rang } A$). Sea $X = \{\|\check{c} \in \sigma\| \mid c \in C\} \in M$ y llamemos $\mathbb{C} \in M$ a la subálgebra completa generada M por X en \mathbb{B} . Entonces

\mathbb{C} está completamente contenida ^{M} en \mathbb{B} , luego $H = G \cap \mathbb{C}$ es un ultrafiltro \mathbb{C} -genérico sobre M (teorema 4.39). Se cumple que

$$G \cap X = G \cap \mathbb{C} \cap X = H \cap X \in M[H],$$

luego

$$A = \{c \in C \mid \|\check{c} \in \sigma\| \in G \cap X\} \in M[H].$$

Vamos a comprobar que definiendo $M[A] = M[H]$ se cumple lo pedido. Sea, pues, N un modelo transitivo de ZF tal que $M \subset N$ y $A \in N$. Sólo tenemos que probar que $H \in N$, pues entonces $M[H] \subset N$. En principio tenemos que

$$H \cap X = G \cap X = \{\|\check{c} \in \sigma\| \mid c \in A\} \in N.$$

Llamemos $\kappa = (|\mathbb{C}|^+)^M$. Definimos una sucesión $\{X_\alpha\}_{\alpha \leq \kappa} \in M$ mediante

$$X_0 = X \wedge \bigwedge \alpha < \kappa X_{\alpha+1} = \{\bigvee Z \mid Z \subset X_\alpha \cup X'_\alpha\}^M \wedge \bigwedge \lambda \leq \kappa X_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} X_\delta.$$

Notemos que si $\alpha < \kappa$ entonces $X_\alpha \cup X'_\alpha \subset X_{\alpha+1}$, pues si $a \in X_\alpha \cup X'_\alpha$ basta tomar $Z = \{a\} \in M$, de modo que $\bigvee Z = a$. Si $Z \in M$ cumple $Z \subset X_\kappa$ entonces $|Z|^M < \kappa$, luego existe un $\alpha < \kappa$ tal que $Z \subset X_\alpha$, con lo que $\bigvee Z \in X_{\alpha+1} \subset X_\kappa$. También es obvio que si $a \in X_\kappa$ entonces $a' \in X_\kappa$, luego $X_\kappa \in M$ es una subálgebra completa ^{M} de \mathbb{C} y contiene a X , por lo que $X_\kappa = \mathbb{C}$.

Definimos ahora una sucesión $\{H_\alpha\}_{\alpha \leq \kappa} \in N$. Partimos de $H_0 = H \cap X$, que ya hemos visto que está en N . Si $\alpha < \kappa$ definimos

$$H_{\alpha+1} = \{\bigvee Z \mid Z \in M \wedge Z \subset X_\alpha \cup X'_\alpha \wedge Z \cap (H_\alpha \cup (X_\alpha \setminus H_\alpha)') \neq \emptyset\}.$$

Notemos que $Z \in M$ puede sustituirse por $Z \in (\mathcal{PC})^M \in M \subset N$. Así es fácil ver que $H_{\alpha+1} \in N$.

Finalmente, si $\lambda \leq \kappa$ definimos $H_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} H_\delta$. Es claro que toda la construcción es la relativización a N de una definición recurrente, luego la sucesión $\{H_\alpha\}_{\alpha \leq \kappa}$ está en N , como habíamos afirmado. Vamos a probar por inducción que $H_\alpha = H \cap X_\alpha$, con lo que $H = H_\kappa \in N$ y el teorema quedará probado.

Ciertamente se cumple para $\alpha = 0$ y si vale para todo $\delta < \lambda$ también vale para λ . Supongamos que $H_\alpha = H \cap X_\alpha$ y veámoslo para $\alpha + 1$. Como H es un ultrafiltro, se cumple que $H_\alpha \cup (X_\alpha \setminus H_\alpha)' = H \cap (X_\alpha \cup X'_\alpha)$. En consecuencia todo elemento de $H_{\alpha+1}$ está por encima de un elemento de H , luego está en H . Claramente entonces $H_{\alpha+1} \subset H \cap X_{\alpha+1}$.

Todo elemento de $H \cap X_{\alpha+1}$ es de la forma $\bigvee Z$, donde $Z \in M$, $Z \subset X_\alpha \cup X'_\alpha$. Basta probar que $Z \cap (H_\alpha \cup (X_\alpha \setminus H_\alpha)') \neq \emptyset$, pero es que si se diera el caso contrario entonces $Z \cap H = \emptyset$, luego $Z' \subset H$ y como H es \mathbb{C} -genérico sobre M también $\bigwedge Z' \in H$, luego $\bigvee Z \notin H$, contradicción. ■

Capítulo V

Aplicaciones de las extensiones genéricas

En el capítulo precedente hemos presentado los resultados fundamentales de la teoría de extensiones genéricas, pero sólo hemos tenido ocasión de mostrar algunas aplicaciones elementales que no permiten formarse una idea fidedigna de las posibilidades que ofrece esta teoría. A continuación mostraremos pruebas de consistencia mucho más representativas, entre ellas las que demuestran la independencia de la hipótesis del continuo.

5.1 Conservación de cardinales

Al estudiar una extensión genérica $M[G]$ de un modelo base M es fundamental tener presente que los cardinales en $M[G]$ no tienen por qué coincidir con los cardinales en M . Como “ser un cardinal” es una propiedad Π_1 , es una propiedad absoluta hacia abajo, por lo que todo cardinal en $M[G]$ es también un cardinal en M (recordemos que M y $M[G]$ tienen los mismos ordinales, por lo que todo cardinal en $M[G]$ está en M). En cambio, el recíproco no tiene por qué darse: un cardinal en M no tiene por qué seguir siéndolo en $M[G]$, y ya hemos mostrado un ejemplo de esta situación. La prueba del teorema 4.53 consiste en construir una extensión genérica en la que \aleph_1^M pasa a ser un ordinal numerable $^{M[G]}$.

Esto no debería resultar chocante si tenemos en cuenta que, en realidad, estamos trabajando con modelos numerables, de modo que en realidad ningún cardinal infinito de M (aparte de \aleph_0) es realmente un cardinal, sino que sólo parece serlo porque en M no están las biyecciones que lo desmienten, y la teoría de extensiones nos pone muy fácil añadir tales biyecciones “delatoras” en las extensiones genéricas.

Cuando un cardinal M continúa siendo un cardinal en $M[G]$ se dice que *se conserva*, mientras que si deja de serlo se dice que *se colapsa*. Colapsar cardinales es útil en ciertas pruebas de consistencia, pero otras requieren garantizar

que los cardinales en M siguen siéndolo en $M[G]$, y esta primera sección está dedicada a proporcionar resultados generales que garantizan la conservación de cardinales. Conviene introducir algunos conceptos más precisos:

Definición 5.1 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y κ un cardinal M . Diremos que \mathbb{P} *conserva cardinales* $\geq \kappa$ ($\leq \kappa$) si para todo filtro genérico G y todo ordinal $\alpha \in M$ tal que $\alpha \geq \kappa$ ($\alpha \leq \kappa$) se cumple que

$$\alpha \text{ es un cardinal}^M \leftrightarrow \alpha \text{ es un cardinal}^{M[G]}.$$

Según acabamos de comentar, la implicación \leftarrow se da siempre, luego la conservación de cardinales equivale a que se dé la implicación \rightarrow . Así mismo es suficiente comprobarla para ordinales $\alpha > \omega$, pues ω y los números naturales son cardinales en todo modelo transitivo.

Diremos que \mathbb{P} *conserva cardinales* si esta implicación se cumple para todo ordinal $\alpha \in M$, es decir, si “ser un cardinal” es absoluto para $M - M[G]$.

Diremos que \mathbb{P} *conserva cofinalidades* $\geq \kappa$ ($\leq \kappa$) si para todo filtro genérico G y todo ordinal límite $\lambda \in M$ tal que $\text{cf}^M \lambda \geq \kappa$ ($\text{cf}^M \lambda \leq \kappa$) se cumple $\text{cf}^M \lambda = \text{cf}^{M[G]} \lambda$.

Diremos que \mathbb{P} *conserva cofinalidades* si esto se cumple para todo ordinal límite $\lambda \in M$, es decir, si $\text{cf } \lambda$ es absoluto para $M - M[G]$.

La conservación de cofinalidades y la conservación de cardinales están estrechamente relacionadas:

Teorema 5.2 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y κ un cardinal M . Entonces:

- a) Si \mathbb{P} conserva cofinalidades $\geq \kappa$ y κ es regular M , entonces \mathbb{P} conserva cardinales $\geq \kappa$.
- b) Si \mathbb{P} conserva cofinalidades $\leq \kappa$ entonces \mathbb{P} conserva cardinales $\leq \kappa$.
- c) Si \mathbb{P} conserva cofinalidades entonces \mathbb{P} conserva cardinales.

DEMOSTRACIÓN: Sea α un cardinal M , $\alpha \geq \kappa$, $\alpha > \omega$. Si α es regular M , entonces $\text{cf}^M \alpha = \alpha \geq \kappa$, luego $\text{cf}^{M[G]} \alpha = \text{cf}^M \alpha = \alpha$ y por lo tanto α es un cardinal regular $^{M[G]}$.

Si α es singular M , como κ es regular M ha de ser $\alpha > \kappa$. Tenemos que α es un cardinal límite M , luego $\bigwedge \beta (\kappa < \beta < \alpha \rightarrow \bigvee \mu (\beta < \mu < \alpha \wedge \mu \text{ es regular}^M))$, pero $\kappa < \beta < \mu < \alpha \wedge \mu$ es regular M implica que $\kappa \leq \mu = \text{cf}^M \mu$, luego por hipótesis $\text{cf}^{M[G]} \mu = \text{cf}^M \mu = \mu$, luego μ es regular $^{M[G]}$. Por consiguiente tenemos que $\bigwedge \beta (\kappa < \beta < \alpha \rightarrow \bigvee \mu (\beta < \mu < \alpha \wedge \mu \text{ es un cardinal}^{M[G]}))$. Esto implica que α es un cardinal $^{M[G]}$.

La prueba de b) es análoga.

c) Es consecuencia de a), pues conservar cofinalidades o cardinales es conservar cofinalidades o cardinales $\geq \aleph_1^M$. ■

En realidad para que un c.p.o. conserve cofinalidades basta con que cumpla lo siguiente:

Teorema 5.3 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y κ un cardinal λ^M . Entonces \mathbb{P} conserva cofinalidades $\geq \kappa$ ($\leq \kappa$) si y sólo si para todo filtro genérico G y todo ordinal $\alpha \in M$ tal que $\alpha \geq \kappa$ ($\alpha \leq \kappa$) se cumple*

$$\alpha \text{ regular}^M \rightarrow \alpha \text{ regular}^{M[G]}.$$

DEMOSTRACIÓN: Sea $\lambda \in M$ tal que $\text{cf}^M \lambda \geq \kappa$ ($\leq \kappa$). Sea $f \in M$ tal que $f : \text{cf}^M \lambda \longrightarrow \lambda$ cofinal creciente. Entonces $f \in M[G]$ y por [TC 4.61] concluimos que $\text{cf}^{M[G]} \text{cf}^M \lambda = \text{cf}^{M[G]} \lambda$. Pero $\text{cf}^M \lambda$ es regular M , luego por hipótesis es regular $^{M[G]}$, es decir, $\text{cf}^{M[G]} \text{cf}^M \lambda = \text{cf}^M \lambda$, de donde $\text{cf}^{M[G]} \lambda = \text{cf}^M \lambda$. ■

Resulta natural preguntarse si es posible que un c.p.o. conserve cardinales pero no conserve cofinalidades. Según el teorema anterior, para que esto ocurra es necesario que un cardinal regular M pase a ser singular $^{M[G]}$. En particular será límite $^{M[G]}$ y, si el c.p.o. conserva cardinales, también será límite M . En resumen, ha de haber un cardinal límite regular M que pase a ser singular en $M[G]$. Obviamente este cardinal no puede ser \aleph_0 , luego llegamos a que M ha de contener un cardinal débilmente inaccesible. En otras palabras, en ausencia de cardinales débilmente inaccesibles, conservar cardinales equivale a conservar cofinalidades.

Ahora ya podemos dar condiciones para que un c.p.o. conserve cardinales y cofinalidades.

Definición 5.4 Una *anticadena* en un c.p.o. \mathbb{P} es un conjunto de condiciones incompatibles dos a dos. Si κ es un cardinal, se dice que \mathbb{P} cumple la *condición de cadena κ* (c.c. κ) si toda anticadena en \mathbb{P} tiene cardinal menor que κ .

La c.c. \aleph_1 se llama también *condición de cadena numerable*, pues equivale a que toda anticadena sea numerable.

Vamos a probar que todo c.p.o. con la condición de cadena κ conserva cofinalidades $\geq \kappa$. Para ello nos basaremos en el siguiente resultado técnico, que tiene interés y gran utilidad por sí mismo:

Teorema 5.5 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., $A, B \in M$ y κ un cardinal λ^M tal que (\mathbb{P} cumple la c.c. κ) M . Sea G un filtro genérico y $f \in M[G]$ tal que $f : A \longrightarrow B$. Entonces existe una aplicación $F : A \longrightarrow (\mathcal{P}B)^M$ de modo que $F \in M$, $\bigwedge a \in A |F(a)|^M < \kappa$ y $\bigwedge a \in A f(a) \in F(a)$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\tau \in M^\mathbb{P}$ tal que $f = \tau_G$ y sea $F : A \longrightarrow (\mathcal{P}B)^M$ la aplicación dada por

$$F(a) = \{b \in B \mid \bigvee p \in \mathbb{P} p \Vdash (\tau : \check{A} \longrightarrow \check{B} \wedge \tau(\check{a}) = \check{b})\}.$$

Claramente $F \in M$. Sea $a \in A$ y $b = f(a)$. Así $\tau_G : A \longrightarrow B \wedge \tau_G(a) = b$, luego existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash (\tau : \check{A} \longrightarrow \check{B} \wedge \tau(\check{a}) = \check{b})$, con lo que $b \in F(a)$.

Por el axioma de elección^M existe una función $Q \in M$ tal que $Q : F(a) \longrightarrow \mathbb{P}$ y para todo $b \in F(a)$ se cumple $Q(b) \Vdash (\tau : \check{A} \longrightarrow \check{B} \wedge \tau(\check{a}) = \check{b})$.

Si $b, b' \in F(a)$, $b \neq b'$, entonces $Q(b) \perp Q(b')$, pues si existiera una extensión común $r \in \mathbb{P}$, existiría un filtro genérico H con $r \in H$, y en $M[H]$ se cumpliría que $\tau_H : A \longrightarrow B$ y $b = \tau_H(a) = b'$, contradicción.

En particular Q es inyectiva y $Q[F(a)]$ es una anticadena en \mathbb{P} (en M). Por lo tanto $|F(a)|^M = |Q[F(a)]|^M < \kappa$. ■

En definitiva, el teorema anterior afirma que una aplicación f en una extensión genérica (con dominio en el modelo base M) no puede, por regla general, ser conocida desde M , pero sí puede ser “aproximada” por una función multivaluada. La aproximación será mejor cuanto menor sea la condición de cadena que cumple el c.p.o.

Teorema 5.6 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y κ un cardinal regular^M tal que $(\mathbb{P} \text{ cumple la c.c.}\kappa)^M$. Entonces \mathbb{P} conserva cofinalidades y cardinales $\geq \kappa$. En particular, si $(\mathbb{P} \text{ cumple la c.c.n.})^M$ entonces \mathbb{P} conserva cofinalidades y cardinales.*

DEMOSTRACIÓN: Basta probar que \mathbb{P} conserva cofinalidades $\geq \kappa$. En caso contrario existe un filtro genérico G y un cardinal^M $\mu \geq \kappa$ tal que μ es regular^M y singular^{M[G]}. Sean entonces $\omega \leq \alpha < \mu$ y $f \in M[G]$ de modo que $f : \alpha \longrightarrow \mu$ cofinal. Por el teorema anterior existe $F \in M$ de modo que $F : \alpha \longrightarrow (\mathcal{P}\mu)^M$ y

$$\bigwedge \beta < \alpha |F(\beta)|^M < \kappa \wedge \bigwedge \beta < \alpha f(\beta) \in F(\beta).$$

Sea $S = \bigcup_{\beta < \alpha} F(\beta)$. En M , el conjunto S es una unión de menos de κ conjuntos de cardinal menor que κ . Por la regularidad de κ ha de ser $|S|^M < \kappa$. Ahora bien, para todo $\beta < \alpha$ tenemos que $f(\beta) \in S$, lo que implica que S no está acotado en κ . Esto es una contradicción, pues un cardinal regular no puede tener subconjuntos no acotados de cardinal menor que él mismo. ■

No todos los c.p.o.s que vamos a considerar cumplirán la condición de cadena numerable, así que vamos a dar otro criterio que nos garantice que un c.p.o. conserva cardinales y cofinalidades por debajo de un cardinal dado.

Definición 5.7 *Sea κ un cardinal. Diremos que un c.p.o. \mathbb{P} es κ -cerrado si para todo ordinal $\alpha < \kappa$ y toda sucesión $\{p_\beta\}_{\beta < \alpha}$ decreciente en \mathbb{P} (es decir, tal que $\beta < \gamma < \alpha \rightarrow p_\gamma \leq p_\beta$) se cumple que $\bigvee q \in \mathbb{P} \bigwedge \beta < \alpha q \leq p_\beta$.*

Vamos a probar que los c.p.o.s κ -cerrados conservan cofinalidades y cardinales $\leq \kappa$. Al igual que en el caso de la condición de cadena κ , demostraremos primero un resultado técnico de interés en sí mismo.

Teorema 5.8 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y κ un cardinal^M tal que $(\mathbb{P} \text{ es } \kappa\text{-cerrado})^M$. Sea G un filtro genérico y supongamos que $B \in M[G]$ cumple $B \subset M$ y $|B|^{M[G]} < \kappa$. Entonces $B \in M$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\alpha = |B|^{M[G]} < \kappa$, sea $f \in M[G]$ tal que $f : \alpha \longrightarrow B$ biyectiva. Por el teorema 4.58 existe un $A \in M$ tal que $f : \alpha \longrightarrow A$. Es suficiente probar que $f \in M$, pues entonces también estará en M su rango B . Llamemos $K = (A^\alpha)^M = A^\alpha \cap M$. Hemos de probar que $f \in K$. En caso contrario, si $f = \tau_G$, existe $p \in G$ tal que $p \Vdash (\tau : \check{\alpha} \longrightarrow \check{A} \wedge \tau \notin \check{K})$.

Vamos a ver que existen sucesiones $\{p_\eta\}_{\eta \leq \alpha}$ y $\{z_\eta\}_{\eta < \alpha}$ en M tales que

- a) $p_\eta \in \mathbb{P} \wedge z_\eta \in A$,
- b) $p_0 = p$,
- c) $\bigwedge \epsilon \eta (\epsilon \leq \eta \leq \alpha \rightarrow p_\eta \leq p_\epsilon)$,
- d) $p_{\eta+1} \Vdash \tau(\check{\eta}) = \check{z}_\eta$.

En efecto, por recurrencia y usando el axioma de elección ^{M} podemos construirlas como sigue:

Tomamos $p_0 = p$ y supuestos definidos $\{p_\eta\}_{\eta \leq \beta}$ y $\{z_\eta\}_{\eta < \beta}$ para un $\beta < \alpha$ de modo que se cumplan las condiciones anteriores, entonces $p_\beta \leq p_0 = p$, luego $p_\beta \Vdash \tau : \check{\alpha} \longrightarrow \check{A}$, luego $p_\beta \Vdash \forall x \in \check{A} \tau(\check{\beta}) = x$. Por 4.59 i) existen una condición $p_{\beta+1} \leq p_\beta$ y un $z_\beta \in A$ tales que $p_{\beta+1} \Vdash \tau(\check{\beta}) = \check{z}_\beta$.

Supuestos definidos $\{p_\eta\}_{\eta < \lambda}$ y $\{z_\eta\}_{\eta < \lambda}$ para un ordinal límite $\lambda < \alpha$, como \mathbb{P} es κ -cerrado ^{M} existe una condición $p_\lambda \in \mathbb{P}$ tal que $p_\lambda \leq p_\eta$ para todo $\eta < \lambda$, y entonces $\{p_\eta\}_{\eta \leq \lambda}$ y $\{z_\eta\}_{\eta < \lambda}$ cumplen todas las condiciones.

Sea $g = \{z_\eta\}_{\eta < \alpha} \in M$. Tenemos que $g \in K$. Sea H un filtro genérico tal que $p_\alpha \in H$ (con lo que $\bigwedge \eta \leq \alpha p_\eta \in H$). Por la propiedad c), $\bigwedge \eta < \alpha \tau_H(\eta) = z_\eta$, luego $\tau_H = g \in K$, cuando por otra parte $p_0 \Vdash \tau \notin \check{K}$, contradicción. ■

De este modo, en una extensión por un c.p.o. κ -cerrado no aparecen nuevos subconjuntos de un conjunto dado con cardinal menor que κ . Con esto es fácil probar que ningún cardinal menor que κ puede colapsarse:

Teorema 5.9 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y κ un cardinal ^{M} tal que $(\mathbb{P} \text{ es } \kappa\text{-cerrado})^M$. Entonces \mathbb{P} conserva cofinalidades y cardinales $\leq \kappa$.*

DEMOSTRACIÓN: Basta probar que \mathbb{P} conserva cofinalidades $\leq \kappa$. Si no fuera así, por 5.3 existiría un filtro genérico G y un ordinal $\mu \leq \kappa$ de modo que μ es regular ^{M} pero es singular ^{$M[G]$} . Sea $\alpha < \mu$ y $f \in M[G]$ tal que $f : \alpha \longrightarrow \mu$ cofinal. Claramente $|f|^{M[G]} = |\alpha|^{M[G]} \leq \alpha < \kappa$, luego por el teorema anterior $f \in M$, en contradicción con que μ es regular ^{M} . ■

Terminamos la sección con el siguiente teorema, cuya prueba es inmediata:

Teorema 5.10 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. que conserve cardinales y G un filtro genérico. Entonces, los términos α^+ y \aleph_α son absolutos para $M - M[G]$, es decir, para todo ordinal $\alpha < \Omega^M$ se cumple $(\alpha^+)^M = (\alpha^+)^{M[G]}$ y $\aleph_\alpha^M = \aleph_\alpha^{M[G]}$.*

5.2 Familias cuasidisjuntas

Intercalamos aquí la demostración de un principio combinatorio que nos hará falta en la sección siguiente. Se trata de una generalización de [TC 8.52]. Recordamos la definición [TC 8.51] de sistema Δ :

Definición 5.11 Un conjunto A es una *familia cuasidisjunta* o un *sistema Δ* de raíz r si $\bigwedge xy \in A (x \neq y \rightarrow x \cap y = r)$. Se admite que r sea vacío, en cuyo caso los elementos de A son disjuntos dos a dos.

Teorema 5.12 (Lema de los sistemas Δ) *Sea κ un cardinal infinito, $\mu > \kappa$ un cardinal regular tal que $\bigwedge \alpha < \mu |\alpha^{<\kappa}| < \mu$ y sea A un conjunto tal que $|A| \geq \mu$ y $\bigwedge x \in A |x| < \kappa$. Entonces existe una familia cuasidisjunta $B \subset A$ tal que $|B| = \mu$. En particular, toda familia no numerable de conjuntos finitos posee una subfamilia cuasidisjunta no numerable.*

DEMOSTRACIÓN: Tomando un subconjunto si es necesario, podemos suponer que $|A| = \mu$. Se cumple que

$$\left| \bigcup_{x \in A} x \right| \leq \sum_{x \in A} |x| \leq \sum_{x \in A} \kappa = \mu \cdot \kappa = \mu.$$

Como obviamente no importa cuáles sean los elementos de los elementos de A , no perdemos generalidad si suponemos que son ordinales. Más aún, podemos suponer que $\bigcup_{x \in A} x \subset \mu$.

Si $x \in A$, tenemos que $|x| < \kappa$, luego $\text{ord } x < \kappa$. Podemos descomponer

$$A = \bigcup_{\alpha < \kappa} \{x \in A \mid \text{ord } x = \alpha\}.$$

Como $|A| = \mu$ es regular y $\kappa < \mu$, es necesario que uno de los conjuntos que aparecen en la unión tenga cardinal μ , es decir, existe un ordinal $\rho < \kappa$ tal que el conjunto $\{x \in A \mid \text{ord } x = \rho\}$ tiene cardinal μ . Quedándonos con este subconjunto podemos suponer que $\bigwedge x \in A \text{ ord } x = \rho$.

Para cada $\alpha < \mu$ consideremos el conjunto $\{x \in A \mid x \subset \alpha\}$. A cada uno de sus elementos x le podemos asignar una biyección $g : |x| \longrightarrow x$, que será un elemento de $\alpha^{<\kappa}$. Esto nos da una aplicación inyectiva, de modo que

$$|\{x \in A \mid x \subset \alpha\}| \leq |\alpha^{<\kappa}| < \mu.$$

Así pues, existe al menos un $x \in A$ que no está contenido en α . Equivalentemente, el conjunto $\bigcup_{x \in A} x$ no está acotado en μ , luego tiene cardinal μ .

Para cada $x \in A$ sea $f_x : \rho \longrightarrow x$ la semejanza. Escribiremos $x(\xi) = f_x(\xi)$, de modo que $x = \{x(\xi) \mid \xi < \rho\}$. Como la unión

$$\bigcup_{x \in A} x = \bigcup_{\xi < \rho} \{x(\xi) \mid x \in A\}$$

tiene cardinal μ , alguno de los conjuntos de la derecha tiene que tener también cardinal μ . Llamemos ξ_0 al menor ordinal (quizá igual a 0) tal que

$$|\{x(\xi_0) \mid x \in A\}| = \mu.$$

La situación es la siguiente:

	\vdots		\vdots		\vdots	
	$x(\xi_0)$		$y(\xi_0)$		$z(\xi_0)$	
ρ	\vdots		\vdots		\vdots	
	$x(1)$		$y(1)$		$z(1)$	
	$x(0)$		$y(0)$		$z(0)$	
						A

Cada elemento de A es un conjunto $x = \{x(0), x(1), \dots, x(\xi_0), \dots\}$, donde los $x(\xi)$ son ordinales distintos dos a dos (de hecho, si $\eta < \xi$ entonces $x(\eta) < x(\xi)$), pero dos conjuntos x e y pueden tener elementos en común. Por ejemplo, podría darse el caso de que $x(0)$ fuera el mismo ordinal para todo $x \in A$. La fila ξ_0 del esquema anterior es la primera fila en la que aparecen μ ordinales distintos. Sea

$$\alpha_0 = \bigcup_{\substack{x \in A \\ \eta < \xi_0}} x(\eta) + 1.$$

Notemos que si $\eta < \xi_0$ entonces el conjunto $\{x(\eta) \mid x(\eta) + 1 \mid x \in A\}$ está acotado en μ , luego $\bigcup_{x \in A} \{x(\eta) + 1 \mid x \in A\} \in \mu$. Por consiguiente α_0 es el supremo de un conjunto de ξ_0 ordinales menores que μ . Como μ es regular ha de ser $\alpha_0 < \mu$. De este modo, si $\eta < \xi_0$ y $x \in A$, entonces $x(\eta) < \alpha_0$, es decir, todos los ordinales que aparecen antes de la fila ξ_0 son menores que α_0 .

Para cada $x \in A$, llamemos $\bar{x} \in \mu$ a su supremo. Podemos definir recurrentemente una sucesión $\{x_\alpha\}_{\alpha < \mu}$ de elementos de A de modo que

$$\bigwedge \alpha < \mu x_\alpha(\xi_0) > \alpha_0 \cup \bigcup_{\beta < \alpha} \bar{x}_\beta.$$

En particular, cada x_α es distinto de los anteriores, luego tenemos μ elementos distintos. Eliminando los restantes, podemos suponer que $A = \{x_\alpha \mid \alpha < \mu\}$.

\vdots	\vdots		\vdots	
$x_0(\xi_0)$	$x_1(\xi_0)$	\cdots	$x_\alpha(\xi_0)$	\cdots
ρ	\vdots		\vdots	
$x_0(1)$	$x_1(1)$	\cdots	$x_\alpha(1)$	\cdots
$x_0(0)$	$x_1(0)$	\cdots	$x_\alpha(0)$	\cdots
				A

Ahora, si $x, y \in A$ son distintos, se cumple que $x \cap y \subset \alpha_0$, pues si $x = x_\alpha$, $y = y_\beta$, para $\alpha < \beta < \mu$, entonces $y(\xi_0) > \alpha_0 \cup \bar{x}$, luego los elementos comunes a x e y son de la forma $y(\delta)$, con $\delta < \xi_0$, luego son todos menores que α_0 .

Para cada $x \in [\alpha_0]^{<\kappa}$ (representamos así el conjunto de los subconjuntos de α_0 de cardinal menor que κ) escogemos una biyección $g : |x| \longrightarrow x$, de modo que tenemos una aplicación inyectiva de $[\alpha_0]^{<\kappa}$ en $\alpha_0^{<\kappa}$. Así, $|[\alpha_0]^{<\kappa}| < |\alpha_0^{<\kappa}| < \mu$ (por hipótesis). En resumen, α_0 tiene menos de μ subconjuntos de cardinal menor que κ . Descomponemos

$$A = \bigcup_{r \in [\alpha_0]^{<\kappa}} \{x \in A \mid x \cap \alpha_0 = r\}.$$

Aplicando una vez más la regularidad de μ concluimos que existe un $r \subset \alpha_0$ tal que el conjunto $B = \{x \in A \mid x \cap \alpha_0 = r\}$ tiene cardinal μ . Ciertamente B es la familia cuasidisjunta que buscábamos, pues si $x, y \in B$, $x \neq y$, sabemos que $x \cap y \subset \alpha_0$, luego

$$x \cap y = x \cap y \cap \alpha_0 = (x \cap \alpha_0) \cap (y \cap \alpha_0) = r \cap r = r.$$

■

5.3 Extensiones con funciones parciales

En el capítulo anterior hemos considerado únicamente dos ejemplos concretos de c.p.o.s, y ambos eran conjuntos de funciones parciales de un conjunto en otro. En esta sección estudiaremos con detalle este tipo de c.p.o.s y veremos que son suficientes para probar la consistencia de una gran variedad de afirmaciones.

Definición 5.13 Sea κ un cardinal infinito y sean I, J conjuntos tales que $\kappa \leq |I|$ y $2 \leq |J|$. Definimos

$$\text{Fn}(I, J, \kappa) = \{p \mid p \subset I \times J \wedge p \text{ es una función} \wedge |p| < \kappa\}.$$

Consideramos en $\text{Fn}(I, J, \kappa)$ el orden parcial dado por $p \leq q \leftrightarrow q \subset p$. De este modo $\text{Fn}(I, J, \kappa)$ es un c.p.o. con máximo $\mathbb{1} = \emptyset$. Claramente es no atómico.

Observemos que a partir de dos biyecciones $f : I \longrightarrow I'$ y $g : J \longrightarrow J'$ es fácil construir una semejanza $h : \text{Fn}(I, J, \kappa) \longrightarrow \text{Fn}(I', J', \kappa)$, por lo que, en virtud de los teoremas 4.40 y 4.48, ambos c.p.o.s dan lugar a las mismas extensiones genéricas. Por lo tanto, desde un punto de vista teórico podríamos restringirnos a considerar c.p.o.s de la forma $\text{Fn}(\mu, \nu, \kappa)$, donde μ, ν, κ son cardinales. Sin embargo, en la práctica suele ser más cómodo elegir oportunamente los conjuntos I y J , sobre todo I .

Teorema 5.14 Sean I, J dos conjuntos con $|J| \geq 2$ y sea κ un cardinal infinito tal que $\kappa \leq |I|$. Entonces $\mathbb{P} = \text{Fn}(I, J, \kappa)$ es un c.p.o. casi homogéneo.

DEMOSTRACIÓN: Sean $p, q \in \mathbb{P}$. Entonces sus dominios son subconjuntos de I de cardinal menor que κ . Podemos tomar $A \subset I$ cuyo cardinal sea igual al del dominio de p y que sea disjunto del dominio de q . Existe $g : I \longrightarrow I$ biyectiva tal que $g[A] = Dp$. Definimos $f : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{P}$ mediante $f(r) = g \circ r$. Es fácil ver que $g \in \text{Aut } \mathbb{P}$ y $Df(p) = A$, luego los dominios de $f(p)$ y q son disjuntos, por lo que $\neg f(p) \perp q$. ■

Teorema 5.15 Sea κ un cardinal infinito y sean I, J conjuntos tales que $\kappa \leq |I|$ y $2 \leq |J|$. Entonces $\text{Fn}(I, J, \kappa)$ cumple la c.c. $(|J|^{<\kappa})^+$.

DEMOSTRACIÓN: Sea $\mu = (|J|^{<\kappa})^+$ y supongamos que $\{p_\alpha\}_{\alpha < \mu}$ es una anticadena en $\text{Fn}(I, J, \kappa)$. Supongamos primero que κ es regular. Entonces si $\alpha < \mu$ se cumple que $|\alpha| \leq |J|^{<\kappa}$, luego $|\alpha^{<\kappa}| = |\alpha|^{<\kappa} \leq (|J|^{<\kappa})^{<\kappa} = |J|^{<\kappa} < \mu$ (donde hemos usado [TC 5.11]).

Tenemos, por tanto, que $\bigwedge \alpha < \mu |\alpha^{<\kappa}| < \mu$, por lo que κ y μ cumplen las hipótesis del lema de los sistemas Δ . La familia $A = \{\mathcal{D}p_\alpha\}_{\alpha < \mu}$ tiene cardinal μ , pues $\{p_\alpha | \alpha < \mu\} \subset \bigcup_{x \in A} J^x$, luego la unión tiene cardinal μ , mientras que para todo $x \in A$ se cumple que $|x| < \kappa$, luego $|J^x| \leq |J|^{<\kappa} < \mu$. Esto obliga a que $|A| = \mu$.

Por el lema de los sistemas Δ existe un $x \subset \mu$ tal que $\{\mathcal{D}p_\alpha\}_{\alpha \in x}$ tiene cardinal μ y es una familia cuasidisjunta de raíz r . Sea $B = \{p_\alpha\}_{\alpha \in x}$.

Se cumple que $B \subset \bigcup_{u \in J^r} \{x \in B | x|_r = u\}$. Como $|J^r| \leq |J|^{<\kappa} < \mu$ y μ es regular, ha de existir un $u \in J^r$ tal que $|\{x \in B | x|_r = u\}| = \mu$. En particular existen al menos dos elementos distintos $x, y \in B$ tales que $x|_r = y|_r = u$. Ahora bien, r es precisamente la intersección de los dominios de x e y , pues ambos están en B , y como x e y coinciden en su dominio común admiten como extensión la condición $x \cup y$, en contradicción con que ambos pertenecen a la anticadena de partida, luego deberían ser incompatibles.

Supongamos ahora que κ es singular. Entonces

$$\{p_\alpha | \alpha < \mu\} \subset \bigcup_{\nu < \kappa} \{p_\alpha | \alpha < \mu \wedge |p_\alpha| < \nu^+\}.$$

Como μ es regular, existe un $\nu < \kappa$ tal que $\{p_\alpha | \alpha < \mu \wedge |p_\alpha| < \nu^+\}$ tiene cardinal μ , y es una anticadena de cardinal mayor o igual que $(|J|^{<\nu^+})^+$ en $\text{Fn}(I, J, \nu^+)$, en contradicción con el caso ya probado. ■

No es difícil probar que $\text{Fn}(I, J, \kappa)$ tiene anticadenas de cardinal $|J|^{<\kappa}$, por lo que el teorema anterior no puede mejorarse. Por otra parte tenemos:

Teorema 5.16 Sean I, J conjuntos y κ un cardinal regular tal que $\kappa \leq |I|$ y $2 \leq |J|$. Entonces $\text{Fn}(I, J, \kappa)$ es κ -cerrado.

DEMOSTRACIÓN: Sea $\alpha < \kappa$ y $\{p_\beta\}_{\beta < \alpha}$ una sucesión decreciente en $\text{Fn}(I, J, \kappa)$. Sea $q = \bigcup_{\beta < \alpha} b_\beta$. Claramente q es una función y $q \subset I \times J$. Como κ es regular $|q| < \kappa$. Por lo tanto $q \in \text{Fn}(I, J, \kappa)$ y claramente $\bigwedge \beta < \alpha q \leq q_\beta$. ■

Ahora podemos aplicar los resultados que conocemos sobre conservación de cardinales:

Teorema 5.17 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sean $I, J \in M$ y κ un cardinal regular M de modo que $2 \leq |J|$ y $\kappa \leq |I|^M$. Sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(I, J, \kappa)^M$.

a) \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades $\leq \kappa$,

- b) Si se cumple ($|J| \leq 2^{<\kappa})^M$, entonces \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades $\geq ((2^{<\kappa})^+)^M$,
- c) Si se cumple ($|J| \leq \kappa \wedge 2^{<\kappa} = \kappa)^M$, entonces \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades.

DEMOSTRACIÓN: a) y b) son aplicaciones inmediatas de 5.6 y 5.9 y los dos teoremas anteriores. Para el apartado b) observamos que (en M) se cumple que $|J|^{<\kappa} \leq (2^{<\kappa})^{<\kappa} = 2^{<\kappa} \leq |J|^{<\kappa}$, luego $|J|^{<\kappa} = 2^{<\kappa}$ y tenemos que \mathbb{P} cumple la condición de cadena $(2^{<\kappa})^+$.

En el caso c) tenemos por a) y b) que \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades $\leq \kappa$ y $\geq (\kappa^+)^M$, luego conserva cardinales y cofinalidades. ■

En resumen, las condiciones que han de darse para que el c.p.o. $\text{Fn}(I, J, \kappa)^M$ conserve cardinales y cofinalidades son que en M :

$$2 \leq |J| \leq \kappa = 2^{<\kappa} \leq |I|.$$

La condición $\kappa = 2^{<\kappa}$ se da, por ejemplo, si se cumple la hipótesis del continuo generalizada bajo κ , es decir, si $2^\mu = \mu^+$ para todo cardinal infinito $\mu < \kappa$.

Ahora estamos en condiciones de estudiar la función del continuo en una extensión genérica respecto a un c.p.o. de funciones parciales. El hecho básico es que si M es un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} = \text{Fn}(I, J, \kappa)^M$ y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces

$$f_G = \bigcup_{p \in G} p \in M[G]$$

cumple que $f_G : I \longrightarrow J$, pues para cada $i \in I$ el conjunto

$$D_i = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall j \in J \ (i, j) \in p\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} , luego $G \cap D_i \neq \emptyset$ y esto se traduce en que f_G está definida en i .

Podemos refinar este argumento. En efecto, consideremos ahora el c.p.o. $\mathbb{P} = \text{Fn}(\alpha \times \kappa, 2, \kappa)^M$, donde $\alpha \in M$ es un ordinal no nulo y κ es un cardinal infinito. En principio tenemos una función $f_G : \alpha \times \kappa \longrightarrow 2$, a partir de la cual podemos definir, para cada $\beta < \alpha$, la función $f_\beta : \kappa \longrightarrow 2$ dada por $f_\beta(\delta) = f_G(\beta, \delta)$. Sigue que las funciones f_β están obviamente en $M[G]$ y son distintas dos a dos, pues si $\beta < \gamma < \alpha$, entonces el conjunto

$$D_{\beta\gamma} = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall \delta \in \kappa \ ((\beta, \delta), (\gamma, \delta) \in \mathcal{D}(p) \wedge p(\beta, \delta) \neq p(\gamma, \delta))\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} , luego corta a G y eso se traduce en que existe un $\delta < \kappa$ tal que $f_\beta(\delta) \neq f_\gamma(\delta)$.

Así pues, la aplicación $F : \alpha \longrightarrow (\kappa 2)^{M[G]}$ dada por $F(\beta) = f_\beta$ es inyectiva y claramente $F \in M[G]$. Esto prueba que $(|\alpha| \leq 2^\kappa)^{M[G]}$.

A partir de aquí es fácil construir modelos de ZFC en los que, por ejemplo, $2^{\aleph_0} \geq \aleph_5$, con lo que tenemos probada la independencia de la hipótesis del continuo. No damos los detalles ahora porque dentro de poco estaremos en condiciones de calcular exactamente la función del continuo en una extensión como la que acabamos de considerar.

Nota En la situación precedente, observemos que si $\mathbb{Q} = \text{Fn}(\kappa, 2, \kappa)^M$, entonces las funciones f_β anteriores son \mathbb{Q} -genéricas sobre M , en el sentido de que $G_\beta = \{q \in \mathbb{Q} \mid q \subset f_\beta\}$ es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M y obviamente $f_\beta = \bigcup_{q \in G_\beta} q$.

En efecto, es fácil ver que la aplicación $i_\beta : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{P}$ dada por

$$i_\beta(q) = \{(\beta, \alpha, j) \mid (\alpha, j) \in q\}$$

es una inmersión completa¹ y que $i_\beta^{-1}[G] = G_\beta$, con lo que la genericidad de G_β es consecuencia del teorema 4.39. Por consiguiente, podemos decir que los conjuntos $a_\beta = f_\beta^{-1}[\{1\}]$ son subconjuntos genéricos de κ , y por ello es habitual referirse a $\text{Fn}(\alpha \times \kappa, 2, \kappa)$ como “el c.p.o. que añade α subconjuntos genéricos de κ ”. A su vez, la extensión $M[G]$ es “la extensión de M que resulta de añadir α subconjuntos genéricos de κ ”.

Si $1 \leq \alpha \leq \kappa$, entonces $\text{Fn}(\alpha \times \kappa, 2, \kappa)$ es semejante a $\text{Fn}(\kappa, 2, \kappa)$, por lo que “la extensión de M que resulta de añadir κ subconjuntos genéricos de κ ” es la misma que “la que resulta de añadir un subconjunto genérico de κ ”, es decir, la obtenida con $\text{Fn}(\kappa, 2, \kappa)$. A su vez, si $\mu \geq \kappa$ es un cardinal ^{M} , “la extensión que resulta de añadir μ subconjuntos genéricos de κ ” es simplemente la dada por $\text{Fn}(\mu, 2, \kappa)$. ■

Ahora necesitamos cotas superiores para el número de subconjuntos de un cardinal dado en una extensión genérica. Para ello hemos de hacer ciertas cuentas, la primera y más elemental de las cuales es la siguiente:

Teorema 5.18 *Sea I un conjunto y κ un cardinal, de modo que $\aleph_0 \leq \kappa \leq |I|$. Sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(I, 2, \kappa)$. Entonces $|\mathbb{P}| = |I|^{<\kappa} \leq |I|^\kappa$.*

DEMOSTRACIÓN: Para cada cardinal $\mu < \kappa$, el número de subconjuntos de I de cardinal μ es $|I|^\mu$ y, para cada uno de estos subconjuntos, el número de aplicaciones de él en 2 es 2^μ , luego en total hay $|I|^\mu 2^\mu = |I|^\mu$ condiciones con dominio de cardinal μ . El número total de condiciones será

$$|\mathbb{P}| = \sum_{\mu < \kappa} |I|^\mu = |I|^{<\kappa} \leq \sum_{\mu < \kappa} |I|^\kappa = \kappa \cdot |I|^\kappa = |I|^\kappa. \quad \blacksquare$$

La idea básica es que para contar conjuntos hemos de contar nombres posibles, y para contar nombres hemos de contar las condiciones. De hecho bastará contar nombres de cierto tipo especial:

Definición 5.19 Sea \mathbb{P} un c.p.o. y sean σ, τ dos \mathbb{P} -nombres. Diremos que τ es un *buen nombre* para un subconjunto de σ si para cada $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ existe una anticadena A_π de \mathbb{P} tal que

$$\tau = \bigcup_{\pi} \{\pi\} \times A_\pi,$$

es decir, si $\mathcal{D}\tau \subset \mathcal{D}\sigma$ y cada $\pi \in \mathcal{D}\tau$ aparece acompañado de condiciones incompatibles dos a dos.

¹Si $p \in \mathbb{P}$, una reducción de p a \mathbb{Q} es claramente $\{(\alpha, j) \mid (\beta, \alpha, j) \in p\}$.

Ahora podemos hacer una cuenta elemental:

Teorema 5.20 *Si un c.p.o. \mathbb{P} cumple la c.c. κ y $\sigma \in V^{\mathbb{P}}$, el número de buenos nombres para subconjuntos de σ es a lo sumo $(|\mathbb{P}|^{<\kappa})^{|\mathcal{D}\sigma|}$.*

DEMOSTRACIÓN: Claramente \mathbb{P} tiene a lo sumo $|\mathbb{P}|^{<\kappa}$ anticadenas, y por lo tanto habrá tantos buenos nombres para subconjuntos de σ como asignaciones posibles $\pi \mapsto A_{\pi}$. ■

En particular los buenos nombres para subconjuntos de σ forman un conjunto (mientras que los nombres posibles en general para un subconjunto de σ forman una clase propia). Seguidamente demostramos que todo subconjunto de σ_G en una extensión genérica arbitraria puede nombrarse con un buen nombre para un subconjunto de σ . Así pues, el conjunto de los buenos nombres para subconjuntos de σ ejerce la misma función que el conjunto de nombres S que considerábamos en la demostración de que $M[G]$ cumple el axioma de partes, con la diferencia de que es un conjunto mucho más reducido, con lo que su cardinal nos proporcionará cotas finas de la función del continuo.

Teorema 5.21 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y $\sigma, \mu \in M^{\mathbb{P}}$. Entonces existe un buen nombre^M $\tau \in M^{\mathbb{P}}$ para un subconjunto de σ tal que*

$$\mathbb{1} \Vdash (\mu \subset \sigma \rightarrow \mu = \tau).$$

DEMOSTRACIÓN: Sea $D = \mathcal{D}\sigma$. Usando el lema de Zorn y el axioma de elección en M definimos una sucesión $\{A_{\pi}\}_{\pi \in D} \in M$ tal que para cada $\pi \in D$ el conjunto A_{π} cumpla:

- a) A_{π} es una anticadena en \mathbb{P} .
- b) $\bigwedge p \in A_{\pi} p \Vdash \pi \in \mu$.
- c) A_{π} es maximal para a) y b) (respecto a la inclusión).

Definimos

$$\tau = \bigcup_{\pi \in D} \{\pi\} \times A_{\pi} \in M,$$

que claramente es un buen nombre para un subconjunto de σ . Hemos de probar que cumple lo pedido.

Sea G un filtro genérico y supongamos que $\mu_G \subset \sigma_G$. Sea $a \in \mu_G$. Entonces $a = \pi_G$, con $\pi \in D$. No puede ser $A_{\pi} \cap G = \emptyset$, pues entonces, por 4.18 existiría un $q \in G$ incompatible con todos los elementos de A_{π} . Pasando a una extensión, podemos tomarlo de modo que $q \Vdash \pi \in \mu$, con lo que $A_{\pi} \cup \{q\}$ contradice la maximalidad de A_{π} . Así pues, existe $p \in A_{\pi} \cap G$, y entonces $(\pi, p) \in \tau$, luego $a = \pi_G \in \tau_G$.

Recíprocamente, si $a = \tau_G$, entonces $a = \pi_G$, con $(\pi, p) \in \tau$ y $p \in G$. Entonces $p \in A_{\pi}$, luego $p \Vdash \pi \in \mu$, luego $a = \pi_G \in \mu_G$.

Hemos probado que $\mu_G = \tau_G$, luego $\mu_G \subset \sigma_G \rightarrow \mu_G = \tau_G$. ■

En particular, este teorema nos da la siguiente estimación de la función del continuo:

Teorema 5.22 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., $\sigma \in M^\mathbb{P}$ y κ un cardinal M tal que, en M , el conjunto de buenos nombres para subconjuntos de σ tenga cardinal $\leq \kappa$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces en $M[G]$ se cumple que $2^{|\sigma_G|} \leq |\kappa|$.

DEMOSTRACIÓN: Sea $\{\tau_\alpha\}_{\alpha < \kappa} \in M$ una enumeración de los buenos nombres para subconjuntos de σ en M . Sea $\pi = \{(\text{p.o.}(\check{\alpha}, \tau_\alpha), \mathbb{1}) \mid \alpha < \kappa\} \in M^\mathbb{P}$ y sea $f = \pi_G \in M[G]$.

Claramente f es una aplicación de dominio κ y $\bigwedge \alpha < \kappa f(\alpha) = \tau_{\alpha G}$. Si $x \in (\mathcal{P}\sigma_G)^{M[G]}$, entonces $x = \mu_G$, para cierto $\mu \in M^\mathbb{P}$. Por el teorema anterior existe $\alpha < \kappa$ tal que

$$\mathbb{1} \Vdash (\mu \subset \sigma \rightarrow \mu = \tau_\alpha).$$

Puesto que $\mu_G \subset \sigma_G$, de hecho $x = \mu_G = \tau_{\alpha G} = f(\alpha)$. Así pues, $(\mathcal{P}\sigma_G)^{M[G]}$ está contenido en el rango de f y así, en $M[G]$, se cumple $2^{|\sigma_G|} = |\mathcal{P}\sigma_G| \leq |\kappa|$. ■

Ahora ya podemos probar:

Teorema 5.23 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y, en M , sean κ, μ y ν cardinales que cumplen $\kappa < \mu$, κ regular, $2^{<\kappa} = \kappa$, $\mu^\kappa = \mu$. Sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(\mu, 2, \kappa)^M$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Alternativamente, sea μ un cardinal infinito arbitrario, $\kappa = \omega$ y $\mathbb{P} = \text{Fn}(\mu, 2, \omega)$. Entonces M y $M[G]$ tienen los mismos cardinales y cofinalidades, y además

$$(2^\nu)^{M[G]} = \begin{cases} (2^\nu)^M & \text{si } \nu < \kappa, \\ (\mu^\nu)^M & \text{si } \kappa \leq \nu, \\ (2^\nu)^M & \text{si } \mu \leq \nu. \end{cases}$$

DEMOSTRACIÓN: Por 5.17 tenemos que \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades (bajo las dos hipótesis alternativas). Como \mathbb{P} es κ -cerrado M , el teorema 5.8 nos da que si $\nu < \kappa$ entonces $(\mathcal{P}\nu)^M = (\mathcal{P}\nu)^{M[G]}$, de donde $(2^\nu)^M = (2^\nu)^{M[G]}$ (una biyección en M de $(\mathcal{P}\nu)^M$ con un cardinal es también una biyección en $M[G]$ de $(\mathcal{P}\nu)^{M[G]}$ con un cardinal).

Supongamos ahora que $\kappa \leq \nu$. Según hemos visto tras 5.17, se cumple $(\mu \leq 2^\kappa)^{M[G]} = ((2^\kappa)^\nu)^{M[G]} = (2^\nu)^{M[G]}$. Aquí hay que tener en cuenta que \mathbb{P} puede ser reemplazado por el c.p.o. semejante $\text{Fn}(\mu \times \kappa, 2, \kappa)$). Por consiguiente,

$$(\mu^\nu)^{M[G]} \leq ((2^\kappa)^\nu)^{M[G]} = (2^\nu)^{M[G]}.$$

Por otra parte,

$$({}^\nu \mu)^M = {}^\nu \mu \cap M \subset {}^\nu \mu \cap M[G] = ({}^\nu \mu)^{M[G]},$$

luego $(\mu^\nu)^M \leq (\mu^\nu)^{M[G]} \leq (2^\nu)^{M[G]}$.

Para probar la otra desigualdad vamos a contar los buenos nombres para subconjuntos de $\check{\nu}$ en M . Según 5.18 tenemos que $|\mathbb{P}|^M = (\mu^{<\kappa})^M \leq (\mu^\kappa)^M = \mu$, por hipótesis (y en el caso $\kappa = \omega$ también es claro que $(\mu^{<\kappa})^M = \mu$). Por 5.15

sabemos que \mathbb{P} cumple la condición de cadena κ^+ en M , luego el número de buenos nombres para subconjuntos de $\check{\nu}$ en M es a lo sumo

$$((|\mathbb{P}|^{<\kappa^+})^{|\mathcal{D}\check{\nu}|})^M \leq ((\mu^\kappa)^\nu)^M = (\mu^\nu)^M.$$

Según el teorema anterior, $(2^\nu)^{M[G]} \leq (\mu^\nu)^M$, luego tenemos la igualdad $(2^\nu)^{M[G]} = (\mu^\nu)^M$. En particular, si $\mu \leq \nu$ queda $(2^\nu)^{M[G]} \leq (2^\nu)^M$. ■

Así, en las hipótesis del teorema anterior, el c.p.o. \mathbb{P} altera únicamente la función del continuo de M en el intervalo $\kappa-\mu$. Concretamente convierte en 2^ν a lo que en M era μ^ν . En particular $(2^\kappa)^{M[G]} = (\mu^\kappa)^M = \mu$. Veamos algunos casos particulares.

Teorema 5.24 *Si ZFC es consistente, también lo es ZFC más la hipótesis del continuo generalizada más $V \neq L$ (concretamente, es consistente que existan subconjuntos no constructibles de ω).*

DEMOSTRACIÓN: Sea M un modelo transitivo numerable de $ZFC+V=L$ y sea $\mathbb{P} = Fn(\omega, 2, \omega)$. Sea G un filtro genérico. Por el teorema anterior M y $M[G]$ tienen los mismos cardinales y cofinalidades y como M cumple la HCG, si ν es un cardinal infinito $M[G]$, tenemos que

$$(2^\nu)^{M[G]} = (\omega^\nu)^M = (2^\nu)^M = (\nu^+)^M = (\nu^+)^{M[G]},$$

luego $M[G]$ cumple también la HCG. La función genérica $f_G : \omega \longrightarrow 2$ determina un subconjunto genérico de ω que en particular no está en M , con lo que no es constructible en $M[G]$. ■

Equivalentemente, hemos probado que el axioma de constructibilidad no puede demostrarse ni siquiera suponiendo la hipótesis del continuo generalizada.

Teorema 5.25 *Si ZFC es consistente también lo es la teoría que resulta de añadir como axioma $2^{\aleph_0} = \aleph_2$, o bien $2^{\aleph_0} = \aleph_5$, o bien $2^{\aleph_0} = \aleph_{\omega+1}$, o bien $2^{\aleph_0} = \aleph_{\omega_1}$, o, en general, cualquier axioma que identifique a 2^{\aleph_0} con cualquier cardinal de cofinalidad no numerable.*

DEMOSTRACIÓN: Sea M un modelo transitivo numerable de $ZFC+V=L$. Sea κ un cardinal M de cofinalidad no numerable (en M). Para los ejemplos del enunciado tomaríamos $\kappa = \aleph_2^M$, o bien $\kappa = \aleph_5^M$, etc. Sea $\mathbb{P} = Fn(\kappa, 2, \omega)$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Ciertamente $(2^{<\aleph_0} = \aleph_0)^M$ y por la HCG M se cumple $(\kappa^{\aleph_0} = \kappa)^M$ (aquí usamos que κ tiene cofinalidad no numerable). El teorema 5.23 nos da entonces que $(2^{\aleph_0})^{M[G]} = (\kappa^{\aleph_0})^M = \kappa$. ■

Ejemplo Si usamos $\mathbb{P} = Fn(\omega_2, 2, \aleph_0)^M$ a partir de un modelo M que cumpla la HCG obtenemos un modelo en el que

$$2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_1} = \aleph_2 \wedge \bigwedge \alpha > 1 2^{\aleph_\alpha} = \aleph_{\alpha+1}.$$

Las comprobaciones son todas rutinarias: La hipótesis $2^{<\kappa} = \kappa$ de 5.23 se cumple siempre que partamos de un modelo con la HCG. La hipótesis $\mu^\kappa = \mu$ es en nuestro caso $\aleph_2^{\aleph_0} = \aleph_2$, que se cumple (en M) también por la HCG. Por 5.23 tenemos, pues,

$$(2^{\aleph_1})^{M[G]} = (\aleph_2^{\aleph_1})^M = \aleph_2^M = \aleph_2^{M[G]}.$$

Similarmente $(2^{\aleph_0})^{M[G]} = \aleph_2^{M[G]}$ y si $\alpha > 1$ es un ordinal en M , entonces

$$(2^{\aleph_\alpha})^{M[G]} = (\aleph_2^{\aleph_\alpha})^M = (2^{\aleph_\alpha})^M = \aleph_{\alpha+1}^M = \aleph_{\alpha+1}^{M[G]}. \blacksquare$$

Ejemplo Si usamos $\text{Fn}(\omega_{\omega+1}, 2, \aleph_0)^M$ obtenemos la consistencia de

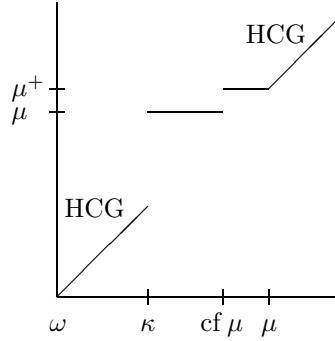
$$\bigwedge n < \omega 2^{\aleph_n} = \aleph_{\omega+1} \wedge \bigwedge \alpha \geq \omega 2^{\aleph_\alpha} = \aleph_{\alpha+1}. \blacksquare$$

Ejemplo Si usamos $\text{Fn}(\omega_{\omega_8}, 2, \aleph_3)$ obtenemos la consistencia de

$$2^{\aleph_0} = \aleph_1 \wedge 2^{\aleph_1} = \aleph_2 \wedge 2^{\aleph_2} = \aleph_3 \wedge 2^{\aleph_3} = \aleph_8 \wedge \dots \wedge 2^{\aleph_7} = \aleph_8 \wedge$$

$$\bigwedge \alpha (8 \leq \alpha \leq \omega_8 \rightarrow 2^{\aleph_\alpha} = \aleph_{\omega_8+1}) \wedge \bigwedge \alpha (\omega_8 \leq \alpha \rightarrow 2^{\aleph_\alpha} = \aleph_{\alpha+1}). \blacksquare$$

El caso totalmente general (tomando $\mathbb{P} = \text{Fn}(\mu, 2, \kappa)$ con $\kappa < \text{cf } \mu$) es:



Si es consistente que exista un cardinal débilmente inaccesible, también lo es que sea precisamente 2^{\aleph_0} . En particular es consistente que exista un cardinal débilmente inaccesible que no sea fuertemente inaccesible.

Teorema 5.26 *Las teorías siguientes son equiconsistentes:*

- a) ZFC + $\forall \kappa \kappa$ es débilmente inaccesible.
- b) ZFC + HCG + $\forall \kappa \kappa$ es débilmente inaccesible.
- c) ZFC + 2^{\aleph_0} es débilmente inaccesible.
- d) ZFC + $\forall \kappa < 2^{\aleph_0} \kappa$ débilmente inaccesible.

DEMOSTRACIÓN: Es claro que la consistencia de b), c) o d) implica la de a). La consistencia de a) implica la de b) porque en a) se prueba que L es un modelo de b). Falta ver que la consistencia de b) implica la de c) y la de d). Trabajando en b), el teorema de reflexión nos da un modelo transitivo numerable M de b). Sea κ un cardinal (fuertemente) inaccesible M y sea $\mu = \kappa$ para probar la consistencia de c) o $\mu = (\kappa^+)^M$ para d). Tomamos $\mathbb{P} = \text{Fn}(\mu, 1, \aleph_0)$ y un filtro genérico G , con el que construimos la extensión genérica $M[G]$. Por 5.17 tenemos que \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades. Como los cardinales en M siguen siendo cardinales en $M[G]$, tenemos que κ sigue siendo un cardinal límite en $M[G]$ y, como las cofinalidades son las mismas, sigue siendo regular. Así pues κ es débilmente inaccesible $^{M[G]}$. Por 5.23 tenemos que en $M[G]$ se cumple además $2^{\aleph_0} = \mu$, luego $M[G]$ es un modelo de c) o d). ■

Ahora vamos a dar el mejor resultado que podemos probar acerca de la función del continuo mediante las técnicas con las que contamos de momento.

Teorema 5.27 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC+V = L. Sea $n \in \omega$ y sean $\kappa_1 < \dots < \kappa_n$ cardinales regulares M y $\mu_1 \leq \dots \leq \mu_n$ cardinales M de manera que $\kappa_i < \text{cf}^M \mu_i$ para cada $i = 1, \dots, n$. Entonces existe un modelo transitivo numerable N de ZFC tal que $M \subset N$, los cardinales de N son los mismos que los de N y $(2^{\kappa_i} = \mu_i)^N$ para todo $i = 1, \dots, n$.*

DEMOSTRACIÓN: En M se cumple $2^{<\kappa_n} = \kappa_n$ y $\mu_n^{\kappa_n} = \mu_n$ por la HCG (ver [TC 5.14], aquí usamos la hipótesis sobre las cofinalidades). Así, si tomamos $\mathbb{P}_1 = \text{Fn}(\mu_n, 2, \kappa_n)^M$ y formamos una extensión genérica $N_1 = M[G_1]$, el teorema 5.23 nos da que N_1 tiene los mismos cardinales y cofinalidades que M , así como que $(2^{\kappa_n} = \mu_n)^{N_1}$ y para todo cardinal infinito M $\nu < \kappa_n$ se cumple $(2^\nu = \nu^+)^{N_1}$.

Similarmente definimos $\mathbb{P}_2 = \text{Fn}(\mu_{n-1}, 2, \kappa_{n-1})^{N_1}$ y formamos una extensión genérica $N_2 = N_1[G_2]$, luego tomamos $\mathbb{P}_3 = \text{Fn}(\mu_{n-2}, 2, \kappa_{n-2})^{N_2}$ y formamos una extensión genérica $N_3 = N_2[G_3]$, etc.

Supongamos que la extensión N_i cumple

- a) Los cardinales y las cofinalidades de N_i son iguales que en M .
- b) $2^{\kappa_j} = \mu_j$ para $j = n - i + 1, \dots, n$,
- c) $2^\nu = \nu^+$ para todo cardinal infinito M $\nu < \kappa_{n-i+1}$ (y así $2^{<\kappa_{n-i}} = \kappa_{n-i}$).

Entonces $(\mu_{n-i}^{\kappa_{n-i}})^{N_i} = (\mu_{n-i}^{\kappa_{n-i}})^M = \mu_{n-i}$. La primera igualdad se debe a que cada \mathbb{P}_j es κ_{n-j+1} -cerrado $^{N_{j-1}}$ y $\kappa_{n-i} < \kappa_{n-j+1}$, para $j = 1, \dots, i$. En la segunda igualdad usamos que M cumple la HCG. Además κ_{n-i} es regular en N_i (porque lo es en M), luego podemos aplicar el teorema 5.23 para concluir que N_{i+1} cumple a) y c), así como que $2^{\kappa_{n-i}} = \mu_{n-i}$. Falta probar que si $j = n - i + 1, \dots, n$ entonces también $(2^{\kappa_j} = \mu_j)^{N_{i+1}}$.

Claramente $(2^{\kappa_j})^{N_{i+1}} \geq (2^{\kappa_j})^{N_i} = \mu_j$. Por 5.23 tenemos también que

$$(2^{\kappa_j})^{N_{i+1}} = (\mu_{n-i}^{\kappa_j})^{N_i} \leq (\mu_j^{\kappa_j})^{N_i} = ((2^{\kappa_j})^{\kappa_j})^{N_i} = (2^{\kappa_j})^{N_i} = \mu_i,$$

luego, efectivamente, N_{i+1} cumple b). La extensión $N = N_n$ cumple el teorema. ■

Ejemplo Si ZFC es consistente, también lo es ZFC más el axioma

$$2^{\aleph_0} = \aleph_1 \wedge 2^{\aleph_1} = 2^{\aleph_2} = \aleph_7 \wedge 2^{\aleph_3} = \aleph_{\omega+15}.$$

En general, es consistente cualquier axioma que determine la función del continuo sobre un número finito de cardinales regulares sin más restricción que la monotonía (no estricta) y el teorema de König [TC 5.6]. ■

Nota La extensión genérica del teorema anterior cumple $V = L[G]$, en el sentido de 3.5, luego concluimos que un modelo $L[A]$ no tiene por qué cumplir necesariamente la HCG (compárese con 3.29). ■

Ahora es natural preguntarse si es posible obtener un resultado similar al teorema anterior pero que sea válido para infinitos cardinales no necesariamente regulares. El argumento que hemos empleado no funciona con infinitos cardinales porque es necesario empezar modificando la función del continuo sobre el mayor de ellos κ_n e ir descendiendo. Sólo así conservamos la HCG bajo el siguiente cardinal a modificar en cada paso, lo cual a su vez es necesario para poder aplicar 5.23. En la sección siguiente veremos la forma de superar este problema.

5.4 Productos

Acabamos de ver que, a través de una sucesión finita de extensiones genéricas, podemos modificar la función del continuo de cualquier forma razonable sobre un conjunto finito de cardinales regulares, y quedaba pendiente el problema de generalizar el resultado a infinitos cardinales. En principio tenemos que resolver dos dificultades: la primera es que el argumento empleado nos obliga a modificar primero la función del continuo sobre el mayor de los cardinales sobre los que queremos alterarla, lo que obliga ya a trabajar con un conjunto finito de cardinales; pero aunque nos las arregláramos para empezar con el cardinal menor, todavía nos queda el segundo problema, y es que no sabemos continuar una sucesión de extensiones

$$M \subset M[G_1] \subset M[G_1][G_2] \subset M[G_1][G_2][G_3] \subset \dots$$

Resolveremos simultáneamente ambos problemas mostrando que una sucesión finita de extensiones genéricas puede reducirse a una única extensión. Entonces quedará claro cómo generalizar el proceso al caso infinito.

Definición 5.28 Sean \mathbb{P} y \mathbb{Q} dos c.p.o.s. Definimos en $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ el preorden dado por

$$(p, q) \leq (p', q') \leftrightarrow p \leq p' \wedge q \leq q'.$$

Claramente esto convierte a $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ en un c.p.o. con máximo $(\mathbf{1}, \mathbf{1})$.

Las aplicaciones $i_{\mathbb{P}} : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ e $i_{\mathbb{Q}} : \mathbb{Q} \longrightarrow \mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ dadas por $i_{\mathbb{P}}(p) = (p, \mathbf{1})$, $i_{\mathbb{Q}}(q) = (\mathbf{1}, q)$ son claramente inmersiones completas. De hecho, una reducción de un par (p, q) a \mathbb{P} es p .

Los resultados que conocemos sobre inmersiones nos dicen que una extensión genérica respecto a $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ contiene una extensión genérica respecto a \mathbb{P} y otra respecto a \mathbb{Q} , pero vamos a probar más que esto: vamos a ver que una extensión respecto a $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ equivale a una extensión respecto a \mathbb{P} seguida de una extensión respecto a \mathbb{Q} . En primer lugar estudiamos los filtros genéricos en productos.

Teorema 5.29 Consideremos un modelo transitivo numerable M de ZFC y sean $\mathbb{P}, \mathbb{Q} \in M$ dos c.p.o.s. Si G es un filtro $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ -genérico sobre M , entonces $G_1 = i_{\mathbb{P}}^{-1}[G]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , $G_2 = i_{\mathbb{Q}}^{-1}[G]$ es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M y $G = G_1 \times G_2$.

DEMOSTRACIÓN: G_1 y G_2 son filtros genéricos por 4.39. Si $(p, q) \in G$, entonces $(p, \mathbf{1}), (\mathbf{1}, q) \in G$ por ser un filtro, luego $(p, q) \in G_1 \times G_2$.

Si $(p, q) \in G_1 \times G_2$ entonces $(p, \mathbf{1}), (\mathbf{1}, q) \in G$, luego existe una condición $(p', q') \in G$ tal que $(p', q') \leq (p, \mathbf{1}), (p', q') \leq (\mathbf{1}, q)$. Esto quiere decir que $p' \leq p \wedge q' \leq q$, luego $(p', q') \leq (p, q)$ y por consiguiente $(p, q) \in G$. ■

No es cierto que el producto de filtros genéricos sea siempre un filtro genérico. La situación exacta viene dada por el teorema siguiente:

Teorema 5.30 (Teorema del producto) Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sean $\mathbb{P}, \mathbb{Q} \in M$ dos c.p.o.s y $G_1 \subset \mathbb{P}$, $G_2 \subset \mathbb{Q}$. Las afirmaciones siguientes son equivalentes:

- a) $G_1 \times G_2$ es un filtro $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ -genérico sobre M .
- b) G_1 es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y G_2 es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G_1]$.
- c) G_2 es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M y G_1 es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre $M[G_2]$.

Si se cumplen estas condiciones, $M[G_1 \times G_2] = M[G_1][G_2] = M[G_2][G_1]$.

DEMOSTRACIÓN: Veamos que a) es equivalente a b). La equivalencia con c) se tiene por simetría.

Supongamos que $G_1 \times G_2$ es $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ -genérico sobre M . Por el teorema anterior $G_1 = i_{\mathbb{P}}^{-1}[G_1 \times G_2]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . También sabemos que G_2 es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M , pero queremos ver que lo es sobre $M[G_1]$. Sea $D \in M[G_1]$ un subconjunto denso de \mathbb{Q} . Entonces $D = \tau_{G_1}$, para cierto $\tau \in M^{\mathbb{P}}$. Sea $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \Vdash \tau$ es denso en $\check{\mathbb{Q}}$. Definimos

$$D' = \{(u, v) \in \mathbb{P} \times \mathbb{Q} \mid u \leq p \wedge u \Vdash \check{v} \in \tau\} \in M.$$

Veamos que D' es denso bajo $(p, \mathbf{1})$. Para ello tomamos $(r, s) \leq (p, \mathbf{1})$. Entonces $r \leq p$, luego $r \Vdash \tau$ es denso en $\check{\mathbb{Q}}$. Por consiguiente

$$r \Vdash \forall x \in \check{\mathbb{Q}} (x \in \tau \wedge x \leq \check{s}).$$

Según 4.59, existen un $v \in \mathbb{Q}$ y un $u \leq r$ tales que $u \Vdash (\check{v} \in \tau \wedge \check{v} \leq \check{s})$. Necesariamente $v \leq s$. Así $(u, v) \leq (r, s)$ y $(u, v) \in D'$. Esto prueba que D' es denso bajo $(p, \mathbf{1})$.

Como $(p, \mathbf{1}) \in G_1 \times G_2$, existe un par $(u, v) \in D' \cap (G_1 \times G_2)$. Entonces $u \Vdash \check{v} \in \tau$, luego $v \in \tau_{G_1} = D$, es decir, $v \in G_2 \cap D$. Esto prueba que G_2 es \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G_1]$.

Supongamos ahora que G_1 es \mathbb{P} -genérico sobre M y que G_2 es \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G_1]$. Es inmediato comprobar que $G_1 \times G_2$ es un filtro en $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$. Para probar que es genérico tomamos un conjunto $D \in M$ denso en $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$. Sea

$$D^* = \{q \in \mathbb{Q} \mid \forall p \in G_1 (p, q) \in D\} \in M[G_1].$$

Veamos que D^* es denso en \mathbb{Q} . Para ello tomamos $t \in \mathbb{Q}$ y definimos

$$D' = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall q \in \mathbb{Q} (q \leq t \wedge (p, q) \in D)\} \in M.$$

Se cumple que D' es denso en \mathbb{P} , pues si $s \in \mathbb{P}$, entonces $(s, t) \in \mathbb{P} \times \mathbb{Q}$, luego existe $(p, q) \in D$ tal que $(p, q) \leq (s, t)$. Así, $p \leq s \wedge p \in D'$.

Sea $p \in D' \cap G_1$, sea $q \leq t$ tal que $(p, q) \in D$. Entonces $q \leq t \wedge q \in D^*$, lo que prueba que D^* es denso en \mathbb{Q} . Como G_2 es genérico sobre $M[G_1]$, existe un $q \in D^* \cap G_2$ y por definición de D^* existe un $p \in G_1$ tal que $(p, q) \in D$, es decir, $(p, q) \in D \cap (G_1 \times G_2) \neq \emptyset$.

Si se cumplen las condiciones del teorema, tenemos que $M \subset M[G_1][G_2]$ y $G_1 \times G_2 \in M[G_1][G_2]$, luego $M[G_1 \times G_2] \subset M[G_1][G_2]$. Por otra parte $M \subset M[G_1 \times G_2]$ y $G_1 \in M[G_1 \times G_2]$, luego $M[G_1] \subset M[G_1 \times G_2]$. Así mismo $G_2 \in M[G_1 \times G_2]$, luego $M[G_1][G_2] \subset M[G_1 \times G_2]$. ■

Observación Un caso frecuente en el que podemos aplicar la teoría sobre productos que acabamos de exponer se da cuando tenemos una unión disjunta $I = I_1 \cup I_2$, de manera que

$$\text{Fn}(I, J, \kappa) \cong \text{Fn}(I_1, J, \kappa) \times \text{Fn}(I_2, J, \kappa),$$

donde la semejanza es la dada por $p \mapsto (p|_{I_1}, p|_{I_2})$. Las inmersiones completas $i_j : \text{Fn}(I_i, J, \kappa) \longrightarrow \text{Fn}(I, J, \kappa)$ son simplemente las inclusiones. ■

5.5 El teorema de Easton

Ahora sabemos cómo reducir dos extensiones genéricas consecutivas a una sola. Ahora es fácil ver que el teorema 5.27 podría haberse probado con una única extensión genérica respecto al producto de todos los c.p.o.s utilizados. Así desaparece el problema del orden en que hay que realizar las extensiones. Hay que tener presente que el c.p.o. \mathbb{P}_2 de la prueba de 5.27, aunque en principio se define en $M[G_1]$, de hecho está en el modelo base M porque \mathbb{P}_1 es κ_n -cerrado M .

Similarmente se concluye que todos los c.p.o.s utilizados están de hecho en M , pues en caso contrario no podríamos formar su producto. Ahora, para obtener un resultado análogo que valga para infinitos cardinales sólo hemos de tomar un producto infinito.

Definición 5.31 Una *función de Easton* es una función E cuyo dominio sea un conjunto A de cardinales regulares y su rango un conjunto de cardinales infinitos, de modo que cumpla las condiciones siguientes:

- a) $\bigwedge \kappa \mu \in A (\kappa \leq \mu \rightarrow E(\kappa) \leq E(\mu))$,
- b) $\bigwedge \kappa \in A \kappa < \text{cf } E(\kappa)$.

Informalmente, una función de Easton es una candidata a función del continuo sobre un conjunto de cardinales regulares. Las condiciones a) y b) recogen dos restricciones que ha de cumplir necesariamente la función del continuo: la monotonía y el teorema de König.

Si E es una función de Easton de dominio A , definimos el *producto de Easton* asociado $\mathbb{P}(E)$ como el conjunto de todos los $p \in \prod_{\kappa \in A} \text{Fn}(E(\kappa), 2, \kappa)$ tales que para todo cardinal regular μ

$$|\{\kappa \in \mu \cap A \mid p(\kappa) \neq \mathbf{1}\}| < \mu.$$

Esta restricción se impone por una cuestión técnica que después se verá en relación con la posible existencia de cardinales inaccesibles. En efecto, notemos que si $\mu = \nu^+$ es un cardinal sucesor entonces la condición se verifica trivialmente, pues a lo sumo hay ν cardinales menores que μ .

En $\mathbb{P}(E)$ definimos el orden dado por $p \leq q \leftrightarrow \bigwedge \kappa \in A p(\kappa) \leq q(\kappa)$. Así $\mathbb{P}(E)$ resulta ser un c.p.o. con máximo $\mathbf{1}$ igual a la condición dada por $\bigwedge \kappa \in A \mathbf{1}(\kappa) = \mathbf{1}$.

Si E es una función de Easton y μ es un cardinal, llamaremos $E_\mu^>$ y $E_\mu^<$ a las restricciones de E a los cardinales de su dominio $> \mu$ o $\leq \mu$, respectivamente. Es muy fácil comprobar que $\mathbb{P}(E) \cong \mathbb{P}(E_\mu^>) \times \mathbb{P}(E_\mu^<)$. La semejanza es simplemente la que a cada condición le asigna el par formado por su restricción a los cardinales $> \mu$ y su restricción a los cardinales $\leq \mu$.

A continuación los teoremas obligados:

Teorema 5.32 Sea E una función de Easton de dominio A y μ un cardinal regular tal que $A \subset \mu^+$ y $2^{<\mu} = \mu$. Entonces $\mathbb{P}(E)$ cumple la c.c. μ^+ .

DEMOSTRACIÓN: Si $p \in \mathbb{P}(E)$, sea $d(p) = \bigcup_{\kappa \in A} \{\kappa\} \times \mathcal{D}p(\kappa)$ y tomemos $B = \{\kappa < \mu \cap A \mid p(\kappa) \neq \mathbf{1}\}$. Por definición de $\mathbb{P}(E)$ sabemos que $|B| < \mu$. Veamos que $|d(p)| < \mu$. En efecto:

$$|d(p)| = \sum_{\kappa \in A} |\mathcal{D}p(\kappa)| \leq \sum_{\kappa \in B} |\mathcal{D}p(\kappa)| + |\mathcal{D}p(\mu)|.$$

El último sumando sólo hace falta si $\mu \in A$, pues por definición $\mu \notin B$. De este modo

$$|d(p)| \leq \sum_{\kappa \in B} \kappa + |\mathcal{D}p(\mu)| < \mu,$$

donde hemos usado la regularidad de μ .

Observemos, por otra parte, que los cardinales μ y μ^+ están en las hipótesis del lema de los sistemas Δ , pues si $\alpha < \mu^+$ se cumple

$$|\alpha^{<\mu}| = |\alpha|^{<\mu} \leq \mu^{<\mu} = (2^{<\mu})^{<\mu} = 2^{<\mu} = \mu,$$

donde hemos usado [TC 5.11].

Consideremos ahora una familia $\{p_\alpha\}_{\alpha < \mu^+}$ de condiciones distintas dos a dos, y veamos que no puede ser una anticadena. Si $\{d(p_\alpha) \mid \alpha < \mu^+\}$ tiene cardinal $\leq \mu$ entonces ha de existir un $x \subset \mu^+$ tal que $|x| = \mu^+$ y $\bigwedge \alpha \in x d(p_\alpha) = r$, para un r fijo.

Si, por el contrario, $\{d(p_\alpha) \mid \alpha < \mu^+\}$ tiene cardinal μ^+ , podemos aplicar el lema de los sistemas Δ , que nos da un $x \subset \mu^+$ tal que $|x| = \mu^+$ y la familia $\{d(p_\alpha)\}_{\alpha \in x}$ es cuasidisjunta de raíz r .

En cualquier caso podemos descomponer

$$x = \bigcup_{f \in 2^r} \{\alpha \in x \mid \bigwedge \kappa i((\kappa, i) \in r \rightarrow p_\alpha(\kappa)(i) = f(\kappa, i))\}.$$

Como $|2^r| \leq 2^{<\mu} = \mu < \mu^+$, ha de existir $f \in 2^r$ tal que el conjunto

$$\{\alpha \in x \mid \bigwedge \kappa i((\kappa, i) \in r \rightarrow p_\alpha(\kappa)(i) = f(\kappa, i))\}$$

tenga cardinal μ^+ .

En particular, si α y β están en este conjunto, para todo $\kappa \in A$ y todo $i \in \mathcal{D}p_\alpha(\kappa) \cap \mathcal{D}p_\beta(\kappa)$ se cumple $(\kappa, i) \in d(p_\alpha) \cap d(p_\beta) = r$, luego $p_\alpha(\kappa)(i) = p_\beta(\kappa)(i)$. Esto implica que $p_\alpha(\kappa)$ y $p_\beta(\kappa)$ son compatibles en $\text{Fn}(E(\kappa), 2, \kappa)$, de donde a su vez se sigue que p_α y p_β son compatibles. ■

Teorema 5.33 *Si E es una función de Easton de dominio A y μ es un cardinal infinito tal que $A \cap \mu^+ = \emptyset$, entonces $\mathbb{P}(E)$ es μ^+ -cerrado.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\{p_\alpha\}_{\alpha < \beta}$ con $\beta < \mu^+$ una sucesión decreciente de condiciones en $\mathbb{P}(E)$. Para cada $\kappa \in A$ se cumple que $\{p_\alpha(\kappa)\}_{\alpha < \beta}$ es una sucesión decreciente de condiciones en $\text{Fn}(E(\kappa), 2, \kappa)$, que es κ -cerrado, y por otra parte $\beta < \mu^+ \leq \kappa$. Por lo tanto existe una condición $p_\kappa \in \text{Fn}(E(\kappa), 2, \kappa)$ de manera que $\bigwedge \alpha < \beta p_\kappa \leq p_\alpha(\kappa)$. Podemos exigir que $p_\kappa = \mathbb{1}$ siempre que $\bigwedge \alpha < \beta p_\alpha(\kappa) = \mathbb{1}$.

Sea $p \in \mathbb{P}(E)$ la condición dada por $\bigwedge \kappa \in A p(\kappa) = p_\kappa$. Se cumple que p es realmente una condición, pues para todo cardinal regular ν se cumple que

$$|\{\kappa \in \nu \cap A \mid p(\kappa) \neq \mathbb{1}\}| = \left| \bigcup_{\alpha < \beta} \{\kappa \in \nu \cap A \mid p_\alpha(\kappa) \neq \mathbb{1}\} \right| < \nu,$$

pues cada uno de los conjuntos de la unión tiene cardinal ν por definición de $\mathbb{P}(E)$ y si de hecho existe un $\kappa \in \nu \cap A$ es porque $\nu > \mu \geq |\beta|$.

Es claro que $\bigwedge \alpha < \beta p \leq p_\alpha$, lo que prueba que $\mathbb{P}(E)$ es μ^+ -cerrado. ■

El teorema siguiente es fundamental para trabajar con productos de Easton:

Teorema 5.34 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC+HCG, $E \in M$ una función de Easton M , $\mathbb{P} = \mathbb{P}(E)^M$, μ un cardinal regular M , $\mathbb{P}_1 = \mathbb{P}(E_\mu^>)$, $\mathbb{P}_2 = \mathbb{P}(E_\mu^≤)$ y G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces existe un filtro G_1 \mathbb{P}_1 -genérico sobre M y un filtro G_2 \mathbb{P}_2 -genérico sobre $M[G_1]$ de modo que $M[G] = M[G_1][G_2]$. Además \mathbb{P}_1 es μ^+ -cerrado M y \mathbb{P}_2 cumple la $(c.c.\mu^+)^{M[G_1]}$.*

DEMOSTRACIÓN: Sabemos que \mathbb{P} es semejante M a $\mathbb{P}_1 \times \mathbb{P}_2$, luego por 4.40 existe un filtro G' que es $\mathbb{P}_1 \times \mathbb{P}_2$ -genérico sobre M y tal que $M[G] = M[G']$. Por el teorema del producto (y el teorema previo) existen filtros G_1 y G_2 que cumplen lo pedido.

Por el teorema anterior, \mathbb{P}_1 es μ^+ -cerrado M , luego conserva cardinales y cofinalidades $\leq \mu^+$. Además, teniendo en cuenta la HCG M ,

$$(2^{<\mu})^{M[G_1]} = (2^{<\mu})^M = \mu.$$

Esto nos permite aplicar el teorema 5.32 en el modelo $M[G_1]$ (notemos que $\mathbb{P}_2 = \mathbb{P}(E_\mu^≤)^{M[G_1]}$) y concluir que \mathbb{P}_2 cumple la $(c.c.\mu^+)^{M[G_1]}$. ■

Teorema 5.35 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC+HCG, $E \in M$ una función de Easton M y $\mathbb{P} = \mathbb{P}(E)^M$. Entonces \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades.*

DEMOSTRACIÓN: En otro caso, por 5.3 existe un filtro genérico G y un cardinal M ν tal que ν es regular M y singular $^{M[G]}$. Sea $\mu = \text{cf}^{M[G]} \nu < \nu$. Entonces μ es regular $^{M[G]}$, luego también es regular M .

Sean $\mathbb{P}_1 = \mathbb{P}(E_\mu^>)^M$ y $\mathbb{P}_2 = \mathbb{P}(E_\mu^≤)^M$. Sean G_1 y G_2 filtros genéricos en las condiciones del teorema anterior.

Sea $f : \mu \longrightarrow \nu$ cofinal, $f \in M[G]$. Como \mathbb{P}_2 cumple la $c.c.\mu^+$ en $M[G_1]$, el teorema 5.5 nos da una aplicación $F : \mu \longrightarrow \mathcal{P}\nu$, $F \in M[G_1]$ de modo que $\bigwedge \alpha < \mu |F(\alpha)|^{M[G_1]} \leq \mu$ y $\bigwedge \alpha < \mu f(\alpha) \in F(\alpha)$.

Para cada $\alpha < \mu$, puesto que $F(\alpha) \subset \nu \subset M$ y $|F(\alpha)|^{M[G_1]} \leq \mu$, el teorema 5.8 nos da que $F(\alpha) \in M$, luego $F \subset M$ y $|F|^{M[G_1]} = \mu$, por lo que de nuevo por 5.8 llegamos a que $F \in M$. Consideraremos entonces el conjunto

$$X = \bigcup_{\alpha < \mu} F(\alpha) \in M.$$

Se cumple que $|X|^M \leq \mu$, pues $\bigwedge \alpha < \mu |F(\alpha)|^M \leq \mu$ (en efecto, una biyección entre $F(\alpha)$ y su cardinal en $M[G_1]$ está en M por 5.8). En particular $|X|^M < \nu$, pero por otra parte X contiene al rango de f , luego no está acotado en ν , y esto contradice la regularidad M de ν . ■

El resultado principal que vamos a probar es que en una extensión genérica a través de un producto de Easton la función del continuo coincide con la correspondiente función de Easton en el dominio de ésta. No obstante vamos a calcular la función del continuo completa de la extensión. Concretamente, será la dada por la definición siguiente:

Definición 5.36 Sea E una función de Easton de dominio A . Para cada cardinal infinito κ sea

$$E'(\kappa) = \kappa^+ \cup \bigcup_{\mu \in A \cap \kappa^+} E(\mu).$$

Por las propiedades de E , es claro que si $\kappa \in A$ entonces $E'(\kappa) = E(\kappa)$. Es claro que E' es la menor función monótona que extiende a E a todos los cardinales infinitos (menor en el sentido de que toma el menor valor posible sobre cada cardinal). Definimos

$$E^*(\kappa) = \begin{cases} E'(\kappa) & \text{si } \text{cf } E'(\kappa) > \kappa, \\ E'(\kappa)^+ & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

También es claro que si $\kappa \in A$ entonces $E^*(\kappa) = E(\kappa)$. Así E^* es la menor extensión de E que respeta la monotonía y el teorema de König.

Teorema 5.37 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC+HCG, $E \in M$ una función de Easton M de dominio A , $\mathbb{P} = \mathbb{P}(E)$ y G un filtro P -genérico sobre M . Entonces en $M[G]$ se cumple que $\bigwedge \kappa (\aleph_0 \leq \kappa \rightarrow 2^\kappa = E^*(\kappa))$. En particular $\bigwedge \kappa \in A 2^\kappa = E(\kappa)$. Además en $M[G]$ se cumple la hipótesis de los cardinales singulares.

DEMOSTRACIÓN: Puesto que \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades, es claro que $E'^M = E'^{M[G]}$ y $E^{*M} = E^{*M[G]}$. Por simplicidad escribiremos simplemente E' y E^* . Así mismo escribiremos μ^+ en lugar de μ^{+M} o $\mu^{+M[G]}$.

Tomemos $\mu \in A$ y sea $i : \text{Fn}(E(\mu), 2, \mu)^M \longrightarrow \mathbb{P}$ la inmersión completa dada por

$$j(p)(\nu) = \begin{cases} p & \text{si } \nu = \mu, \\ 1 & \text{si } \nu \neq \mu. \end{cases}$$

Entonces $G_0 = i^{-1}[G]$ es un filtro $\text{Fn}(E(\mu), 2, \mu)^M$ -genérico sobre M y $M[G_0] \subset M[G]$. Ahora bien, este último c.p.o. añade $E(\mu)$ subconjuntos genéricos a μ , luego $E(\mu) \leq (2^\mu)^{M[G_0]} \leq (2^\mu)^{M[G]}$.

Ahora, si κ es un cardinal M infinito y $\mu \in A \cap \kappa^+$, entonces tenemos que $E(\mu) \leq (2^\mu)^{M[G]} \leq (2^\kappa)^{M[G]}$. Por consiguiente $E'(\kappa) \leq (2^\kappa)^{M[G]}$. Si $\text{cf}^{M[G]} E'(\kappa) = \kappa$ no puede darse la igualdad $E'(\kappa) = (2^\kappa)^{M[G]}$, pues contradiría al teorema de König, luego $E'(\kappa)^+ \leq (2^\kappa)^{M[G]}$. En cualquier caso, concluimos que $E^*(\kappa) \leq (2^\kappa)^{M[G]}$.

Sea $\mu = \text{cf}^M \kappa = \text{cf}^{M[G]} \kappa$. Sean $\mathbb{P}_1, \mathbb{P}_2, G_1$ y G_2 como en el teorema 5.34. Supongamos primeramente que $\mu = \kappa$, es decir, que κ es regular M . Sea $\nu \in A$ tal que $\nu \leq \mu$. Entonces, por 5.18,

$$|\text{Fn}(E(\nu), 2, \nu)|^M \leq |\text{Fn}(E(\mu), 2, \mu)|^M \leq (E(\mu)^\mu)^M \leq (E^*(\mu)^\mu)^M.$$

Por consiguiente $|\mathbb{P}_2|^M \leq ((E^*(\mu)^\mu)^\mu)^M = (E^*(\mu)^\mu)^M = E^*(\mu)$, puesto que $\text{cf}^M E^*(\mu) > \mu$ y M cumple la HCG. De aquí se sigue que $|\mathbb{P}_2|^{M[G_1]} \leq E^*(\mu)$ (pues una biyección entre \mathbb{P}_2 y su cardinal M también está en $M[G_1]$).

Por otra parte, según 5.34, \mathbb{P}_2 cumple la c.c. μ^+ en $M[G_1]$ luego, según el teorema 5.20, el número de buenos nombres para subconjuntos de $\check{\mu}$ en $M[G_1]$ es a lo sumo

$$(((E^*(\mu)^\mu)^\mu)^M)^{G_1} = (E^*(\mu)^\mu)^{M[G_1]} = (E^*(\mu)^\mu)^M = E^*(\mu).$$

(Al pasar de $M[G_1]$ a M hemos usado que \mathbb{P}_1 es μ^+ -cerrado M .)

Ahora usamos 5.22 para concluir que en $M[G_1][G_2] = M[G]$ se verifica la desigualdad $2^\mu \leq E^*(\kappa)$ y, por lo probado anteriormente, la igualdad.

En resumen, tenemos que $(2^\kappa = E^*(\kappa))^{M[G]}$ para todo cardinal regular $^M \kappa$. Supongamos ahora que κ es singular M , es decir, que $\mu < \kappa$. En primer lugar probaremos que $(E^*(\kappa)^\mu)^{M[G]} = E^*(\kappa)$.

Tomemos $f \in (\mu E^*(\kappa))^{M[G]}$. Como \mathbb{P}_2 cumple la c.c. μ^+ en $M[G_1]$, por una variante (consecuencia inmediata) de 5.5 existe $F \in (\mu \times \mu E^*(\kappa))^{M[G_1]}$ tal que

$$\wedge \alpha < \mu \vee \beta < \mu \ f(\alpha) = F(\alpha, \beta). \quad (*)$$

Como \mathbb{P}_1 es μ^+ -cerrado M , en realidad $F \in M$. Por la HCG M existen a lo sumo $E^*(\kappa)$ funciones como F en M (aquí usamos que $\text{cf}^M E^*(\kappa) > \mu$). Para cada $F \in (\mu \times \mu E^*(\kappa))^M$, el número de aplicaciones $f \in (\mu E^*(\kappa))^{M[G]}$ que cumplen (*) es a lo sumo $(\mu^\mu)^{M[G]} = (2^\mu)^{M[G]} = E^*(\mu) \leq E^*(\kappa)$, donde hemos usado la parte ya probada para cardinales regulares (μ es regular M).

En resumen, hay a lo sumo $E^*(\kappa)$ posibilidades para F y, para cada una de ellas, hay a lo sumo $E^*(\kappa)$ posibilidades para f , luego

$$|\mu E^*(\kappa)|^{M[G]} \leq (E^*(\kappa) \cdot E^*(\kappa))^{M[G]} = E^*(\kappa).$$

Así pues, $(E^*(\kappa)^\mu)^{M[G]} = E^*(\kappa)$, como queríamos probar.

Sea B el conjunto de todos los subconjuntos acotados de κ en $M[G]$ y sea R el conjunto de todos los cardinales regulares M menores que κ . Entonces

$$|B|^{M[G]} \leq \left| \bigcup_{\nu \in R} \mathcal{P}\nu \right|^{M[G]} \leq \left(\sum_{\nu \in R} E^*(\nu) \right)^{M[G]} \leq (\kappa \cdot E^*(\kappa))^{M[G]} = E^*(\kappa).$$

Sea $f : (B^\mu)^{M[G]} \longrightarrow (\mathcal{P}\kappa)^{M[G]}$ dada por $f(g) = \bigcup_{\alpha < \mu} g(\alpha)$. Es claro que $f \in M[G]$ y es suprayectiva, luego

$$(2^\kappa)^{M[G]} = |\mathcal{P}\kappa|^{M[G]} \leq |B^\mu|^{M[G]} \leq (E^*(\kappa)^\mu)^{M[G]} = E^*(\kappa).$$

La otra desigualdad ya estaba probada, con lo que tenemos $(2^\kappa)^{M[G]} = E^*(\kappa)$ para todo cardinal M infinito κ .

Nos falta probar que en $M[G]$ se cumple la hipótesis de los cardinales singulares. Para ello tomamos un cardinal singular $^{M[G]}$ κ , llamamos $\mu = \text{cf}^{M[G]} \kappa$ y suponemos que $(2^\mu)^{M[G]} < \kappa$. Hemos de probar que $(\kappa^\mu = \kappa^+)^{M[G]}$.

Consideramos \mathbb{P}_1 , \mathbb{P}_2 , G_1 y G_2 como antes. Tomamos $f \in (\mu^\kappa)^{M[G]}$. Sea $F \in (\mu \times \mu_\kappa)^{M[G_1]}$ que cumpla (*). Igual que antes, concluimos que $F \in M$, y que el número de aplicaciones F posibles es a lo sumo $(\mu^\mu)^M = \mu^+$. Para cada una de ellas, las posibilidades para f son $(\mu^\mu)^{M[G]} = (2^\mu)^{M[G]} < \kappa$, luego en definitiva

$$(\kappa^\mu)^{M[G]} = |\mu^\kappa|^{M[G]} \leq (\kappa^+ \cdot \kappa)^{M[G]} = \kappa^+.$$

La desigualdad contraria es el teorema de König. ■

De aquí se sigue el teorema siguiente:

Teorema 5.38 (Teorema de Easton) *Si ZFC es consistente también lo es ZFC más cualquier sentencia que determine la función del continuo y que respete las condiciones siguientes:*

- a) MONOTONÍA: Si $\kappa \leq \mu$ entonces $2^\kappa \leq 2^\mu$,
- b) TEOREMA DE KÖNIG: $\kappa < 2^{\text{cf } \kappa}$,
- c) HCS: Si κ es singular, entonces $2^\kappa = \begin{cases} 2^{<\kappa} & \text{si } \kappa < \text{cf } 2^{<\kappa}, \\ (2^{<\kappa})^+ & \text{si } \kappa = \text{cf } 2^{<\kappa}. \end{cases}$

La propiedad c) es la consecuencia que tiene la HCS sobre la función del continuo, de modo que la extensión genérica del teorema 5.37 cumple c) porque cumple la HCS.

En realidad el enunciado del teorema de Easton no es exacto, pues hay que exigir que la sentencia en cuestión cumpla algunas condiciones. Por ejemplo, sería absurdo pretender que 2^{\aleph_0} fuera el mínimo cardinal fuertemente inaccesible. Lo que sucede es que si partimos de un modelo M que tenga un (mínimo) cardinal fuertemente inaccesible κ , podemos construir una función de Easton E tal que $E(\aleph_0) = \kappa$, y en la extensión genérica correspondiente se cumplirá que $2^{\aleph_0} = \kappa$, sólo que κ ya no será fuertemente inaccesible. En definitiva, hay que exigir que si en un modelo M definimos una función de Easton E de acuerdo con la sentencia cuya consistencia queremos probar, la función E en una extensión genérica ha de cumplir lo mismo que le hemos pedido en M . Es más fácil comprobarlo en cada caso concreto que no tratar de dar condiciones generales sobre sentencias válidas. Esto sólo descarta sentencias obviamente contradictorias.

Por otra parte, el teorema 5.37 no permite probar exactamente el teorema de Easton tal y como lo hemos enunciado. Ello se debe a que hemos exigido que el dominio de una función de Easton sea un conjunto, lo que sólo nos capacita para modificar la función del continuo en un conjunto de cardinales regulares, y no en todos ellos. Esto puede resolverse de dos formas. Una de ellas (tal y como hizo Easton) es eliminar la restricción y trabajar con funciones de Easton definidas sobre todos los cardinales regulares. Esto hace que el producto de Easton sea una clase propia en M , es decir, no tenemos un $\mathbb{P}(E) \in M$, sino una fórmula relativizada a M que determina las condiciones de $\mathbb{P}(E)$. La teoría general sobre extensiones genéricas no es válida para preórdenes que sean clases

propias. Así, no es posible probar en general que una extensión genérica de este tipo satisfaga el axioma de reemplazo o el axioma de partes. Sin embargo, las características concretas de los productos de Easton, en particular la posibilidad de factorizar según el teorema 5.34, permiten probar lo necesario en este caso concreto.

Hay otra posibilidad mucho más sencilla que exige tan sólo una hipótesis ligeramente más fuerte. Por ejemplo, supongamos que queremos probar la consistencia de que para todo cardinal regular κ se cumpla $2^\kappa = \kappa^{++}$. Partiendo de la HCG, esto exige modificar la función del continuo en todos los cardinales regulares. Para ello partimos de un modelo transitivo numerable M de ZFC+HGC que contenga un cardinal inaccesible μ . En M , definimos la función de Easton cuyo dominio es el conjunto de todos los cardinales regulares M menores que μ y que venga dada por $E(\kappa) = \kappa^{++}$. Formamos el producto de Easton $\mathbb{P}(E)^M$ y la extensión correspondiente $M[G]$, de modo que en $M[G]$ se cumple $2^\kappa = \kappa^{++}$ para todo cardinal regular $\kappa < \mu$. Ahora bien, como $\mathbb{P}(E)^M$ conserva cardinales y cofinalidades, resulta que μ es fuertemente inaccesible $^{M[G]}$. Por consiguiente $N = V_\mu \cap M[G]$ es un modelo transitivo numerable de ZFC donde $2^\kappa = \kappa^{++}$ para todo cardinal regular κ , tal y como queríamos.

En resumen, para probar la consistencia de una sentencia que difiera de la HCG sobre una clase propia de cardinales basta suponer que existe un cardinal inaccesible μ , modificar la función del continuo bajo μ según el teorema 5.37 y luego quedarse con los conjuntos de rango menor que μ de la extensión. De todos modos, insistimos en que la hipótesis sobre el cardinal inaccesible puede eliminarse, y por ello no la hemos incluido en el enunciado del teorema de Easton.

Con esto queda probada la consistencia de cualquier determinación de la función del continuo sobre cardinales regulares que sea compatible con la monotonía y el teorema de König. Sin embargo, la función del continuo sobre los cardinales singulares en una extensión de Easton queda determinada por los valores que toma sobre los cardinales regulares a través de la propiedad c). Esto no significa que no haya otras posibilidades consistentes, sino únicamente que las técnicas que hemos desarrollado no bastan para justificar la consistencia de otras alternativas. Se conocen algunas alternativas consistentes, pero no un resultado general similar al teorema de Easton que diga cuáles son las restricciones necesarias y suficientes que ha de cumplir una determinación de la función del continuo sobre los cardinales singulares para que sea consistente.

5.6 Colapso de cardinales

En todos los ejemplos que hemos visto hasta ahora ha sido fundamental garantizar la conservación de todos los cardinales del modelo de partida. Sin embargo, también puede obtenerse resultados interesantes colapsando cardinales. El teorema siguiente es especialmente notable porque no requiere ninguna hipótesis sobre la aritmética del modelo base.

Teorema 5.39 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea κ un cardinal no numerable M y $\mathbb{P} = \text{Fn}(\kappa, 2, \aleph_1)^M$. Si G es un filtro genérico, entonces $M[G]$ cumple $2^{\aleph_0} = \aleph_1$.*

DEMOSTRACIÓN: Como \mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado M , el teorema 5.9 nos da que \mathbb{P} conserva cardinales $\leq \aleph_1^M$, con lo que $\aleph_1^{M[G]} = \aleph_1^M$. Por otra parte 5.8 implica que $(\omega 2)^{M[G]} = (\omega 2)^M$. Basta construir una aplicación $F : \aleph_1^M \longrightarrow (\omega 2)^M$ suprayectiva que esté en $M[G]$, pues entonces $(|\omega 2| \leq \aleph_1)^{M[G]}$.

Sea $f_G : \kappa \longrightarrow 2$ la función genérica. Definimos $F(\alpha)(n) = f_G(\alpha + n)$. Para probar la suprayectividad tomamos $h \in (\omega 2)^M$. El conjunto

$$D_h = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall \alpha < \aleph_1^M \wedge n \in \omega (p(\alpha + n) = h(n))\}$$

es denso en \mathbb{P} y está en M , por lo que corta a G . Esto se traduce en que existe un $\alpha < \aleph_1^M$ tal que $\bigwedge n \in \omega f_G(\alpha + n) = h(n)$, es decir, $F(\alpha) = h$. ■

El ejemplo típico de c.p.o. colapsante es el siguiente:

Teorema 5.40 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y en M sean κ y μ dos cardinales tales que $\kappa < \mu$ y κ sea regular. Sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(\kappa, \mu, \kappa)$ y sea G un filtro genérico. Entonces*

- a) \mathbb{P} conserva cardinales $\leq \kappa$.
- b) Si $(\mu^{<\kappa} = \mu)^M$ entonces \mathbb{P} conserva cardinales $\geq (\mu^+)^M$.
- c) Si ν es un cardinal M tal que $\kappa \leq \nu \leq \mu$, entonces $(|\nu| = \kappa)^{M[G]}$, es decir, todos los cardinales entre κ y μ se colapsan.

DEMOSTRACIÓN: a) es inmediato, pues \mathbb{P} es κ -cerrado M , luego conserva cardinales $\leq \kappa$.

Similarmente, bajo la hipótesis de b), el teorema 5.15 nos da que \mathbb{P} cumple la condición de cadena $(\mu^+)^M$, luego conserva cardinales $\geq (\mu^+)^M$.

La aplicación genérica $f_G : \mu \longrightarrow \kappa$ es suprayectiva, luego $(|\mu| = \kappa)^{M[G]}$, y esto implica c). ■

Notemos que una condición suficiente para que se cumpla $\mu^{<\kappa} = \mu$ es que se cumpla la HCG y que $\kappa \leq \text{cf } \mu$.

Ejercicio: Probar que si ZFC es consistente también lo es añadir como axioma la sentencia

$$|\aleph_1^L| = |\aleph_2^L| = \aleph_0 \wedge |\aleph_3^L| = |\aleph_4^L| = |\aleph_5^L| = \aleph_1 \wedge |\aleph_6^L| = |\aleph_7^L| = \aleph_2.$$

Sugerencia: Imitar la prueba de 5.27 pero con c.p.o.s colapsantes: primero se colapsa \aleph_2 haciéndolo numerable, luego \aleph_5 (que será \aleph_3 en la extensión previa) volviéndolo de cardinal \aleph_1 (o sea, \aleph_3 en la extensión original), y luego \aleph_7 (que será \aleph_3 en la extensión anterior). Antes hay que probar que si se parte de un modelo que cumple la HCG y se construye una extensión en las condiciones del teorema anterior, ésta sigue cumpliendo la HCG.

Los c.p.o.s considerados en el teorema anterior colapsan un segmento de cardinales hasta uno dado incluyendo a éste. Ahora veremos que es posible colapsar todos los cardinales en un segmento $\kappa-\mu$ conservando a μ (esto no es trivial si μ es un cardinal límite). Como aplicación veremos que \aleph_1 puede ser inaccesible en L .

Definición 5.41 Sean κ y μ dos cardinales. El *orden colapsante de Lévy* es el conjunto

$$\begin{aligned} \text{Lv}(\kappa, \mu) = \{p \subset \kappa \times \mu \times \kappa \mid p \text{ es una función} \wedge |p| < \mu \wedge \\ \wedge \alpha\beta((\alpha, \beta) \in \mathcal{D}p \rightarrow p(\alpha, \beta) < \alpha)\}. \end{aligned}$$

Consideramos en $\text{Lv}(\kappa, \mu)$ el orden dado por $p \leq q \leftrightarrow q \subset p$. Así resulta ser un c.p.o. con máximo $\mathbf{1} = \emptyset$.

Teorema 5.42 Sean $\mu < \kappa$ cardinales regulares tales que o bien $\mu = \omega$ o bien κ es inaccesible. Entonces el c.p.o. $\text{Lv}(\kappa, \mu)$ cumple la condición de cadena κ .

DEMOSTRACIÓN: Si $\alpha < \kappa$ entonces

$$|\alpha^{<\mu}| = |\alpha|^{<\mu} = \sum_{\nu < \mu} |\alpha|^\nu \leq \sum_{\nu < \mu} |\alpha|^\mu \leq \mu 2^{|\alpha|\mu} < \kappa,$$

en el caso en que κ sea inaccesible (y si $\mu = \omega$ la desigualdad es trivial). Por consiguiente κ y μ están en las hipótesis del lema de los sistemas Δ (teorema 5.12).

Si $\{p_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ es una anticadena en $\text{Lv}(\kappa, \mu)$, sea $A = \{\mathcal{D}p_\alpha \mid \alpha < \kappa\}$. Si $|A| < \kappa$ ha de existir un $x \subset \kappa$ con $|x| = \kappa$ y de modo que todas las condiciones $\{p_\alpha\}_{\alpha \in x}$ tienen el mismo dominio r .

Si, por el contrario, $|A| = \kappa$, el lema de los sistemas Δ nos da un $x \subset \kappa$ con $|x| = \kappa$ tal que los dominios de las condiciones $\{p_\alpha\}_{\alpha \in x}$ son una familia cuasidisjunta de raíz r .

En ambos casos tenemos que la intersección de los dominios de dos condiciones distintas cualesquiera de $\{p_\alpha\}_{\alpha \in x}$ es un conjunto fijo $r \subset \kappa \times \mu$ tal que $|r| < \mu < \kappa$. Sea $\sigma = \sup\{\alpha \in \kappa \mid \forall \beta \in \mu (\alpha, \beta) \in r\}$. Claramente $\sigma < \kappa$ y en consecuencia ${}^r\sigma < \kappa$ si κ es inaccesible (y también si $\mu = \omega$, pues entonces r es finito).

Descomponemos

$$\{p_\alpha \mid \alpha \in x\} = \bigcup_{u \in {}^r\sigma} \{p_\alpha \mid \alpha \in x \wedge p_\alpha|_r = u\}.$$

Como κ es un cardinal regular ha de existir un $u \in {}^r\sigma$ tal que el conjunto $\{p_\alpha \mid \alpha \in x \wedge p_\alpha|_r = u\}$ tenga cardinal κ . En particular existirán dos ordinales $\alpha, \beta \in x$ tales que $\alpha \neq \beta$. Así, $p_\alpha \neq p_\beta$, $p_\alpha|_r = p_\beta|_r$ y $\mathcal{D}p_\alpha \cap \mathcal{D}p_\beta = r$. Es claro entonces que p_α y p_β son compatibles, en contradicción con el supuesto de que forman parte de una anticadena.

Hemos probado que en $\text{Lv}(\kappa, \mu)$ no hay anticadenas de cardinal κ , luego cumple la condición de cadena κ . ■

La prueba del teorema siguiente es idéntica a la de 5.16:

Teorema 5.43 *Si μ es un cardinal regular, entonces $\text{Lv}(\kappa, \mu)$ es μ -cerrado.*

Con esto ya podemos determinar el comportamiento de los cardinales en las extensiones del orden de Lévy:

Teorema 5.44 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y sean $\mu < \kappa$ cardinales regulares M tales que $\mu = \omega$ o bien κ es inaccesible M . Sea $\mathbb{P} = \text{Lv}(\kappa, \mu)^M$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces*

- a) \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades $\leq \mu$ y $\geq \kappa$.
- b) Si ν es un cardinal M tal que $\mu < \nu < \kappa$ entonces $|\nu|^{M[G]} = \mu$, luego $(\kappa = \mu^+)^{M[G]}$

DEMOSTRACIÓN: El apartado a) es consecuencia de los teoremas anteriores junto con 5.6 y 5.9.

b) Sea $f_G = \bigcup_{p \in G} p \in M[G]$. El argumento usual nos da que $f_G : \kappa \times \mu \longrightarrow \kappa$, pero la definición de \mathbb{P} implica además que si $\alpha < \kappa$ entonces f_G determina una aplicación $f_\alpha : \mu \longrightarrow \alpha$ mediante $f_\alpha(\beta) = f_G(\alpha, \beta)$. Las aplicaciones f_α son suprayectivas, pues el conjunto

$$D_{\alpha\gamma} = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall \beta \in \mu \ (\alpha, \beta, \gamma) \in p\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} para todo $\gamma < \alpha$, de donde se sigue que γ tiene una antiimagen β por f_α . Así pues, $|\alpha|^{M[G]} \leq \mu$ y si $\mu \leq \alpha < \kappa$ entonces $|\alpha|^{M[G]} = \mu$. ■

La prueba del teorema siguiente es similar a la del teorema 5.23. Lo dejamos a cargo del lector:

Teorema 5.45 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y $\mu < \kappa$ cardinales regulares M tales que κ es inaccesible M . Sea $\mathbb{P} = \text{Lv}(\kappa, \mu)^M$, sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y ν un cardinal $^{M[G]}$. Entonces*

$$(2^\nu)^{M[G]} = \begin{cases} \min\{\mu, (2^\nu)^M\} & \text{si } \nu < \mu, \\ \kappa & \text{si } \nu = \mu, \\ (2^\nu)^M & \text{si } \nu \geq \kappa. \end{cases}$$

En particular, si M cumple la HCG, también la cumple $M[G]$.

Ahora es muy fácil probar la consistencia de que \aleph_1 sea inaccesible L (supuesta la consistencia de que existan cardinales inaccesibles). Es decir, vamos a probar que es consistente que, para alguien que viva en L , el cardinal que nosotros llamamos \aleph_1 no sea el primer cardinal no numerable, sino que haya muchos otros cardinales anteriores a él (cardinales L , naturalmente, es decir, ordinales numerables que no pueden biyectarse con ordinales anteriores mediante una biyección constructible). En particular tendremos que \aleph_1^L , \aleph_2^L , \aleph_ω^L , $\aleph_{\omega_5}^L$, son todos ordinales numerables, pues \aleph_1 , \aleph_2 , etc. son menores que cualquier cardinal inaccesible.

Teorema 5.46 Si $\text{ZFC}+(\forall\kappa \kappa \text{ es inaccesible})$ es consistente, también lo es $\text{ZFC}+\aleph_1$ es inaccesible L . De hecho esta teoría es equiconsistente con las consideradas en 5.26.

DEMOSTRACIÓN: Si $\text{ZFC}+(\forall\kappa \kappa \text{ es inaccesible})$ es consistente, también lo es $\text{ZFC}+V=L+(\forall\kappa \kappa \text{ es inaccesible})$. Trabajando en esta teoría el teorema de reflexión nos da un modelo transitivo numerable de la misma, llamémoslo M . Notemos que κ es fuertemente inaccesible M por la HCG. Sea $\mathbb{P}=\text{Lv}(\kappa, \aleph_0)^M$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Por el teorema anterior $\kappa = \aleph_1^{M[G]}$.

De este modo tenemos que $\aleph_1^{M[G]}$ es inaccesible M o, lo que es lo mismo, $\aleph_1^{M[G]}$ es $(\text{inaccesible}^L)^{M[G]}$. A su vez esto equivale a $(\aleph_1 \text{ es inaccesible}^L)^{M[G]}$. ■

5.7 Construcción de árboles de Suslin

En [TC 9.19] se muestra la construcción de un árbol de Suslin a partir de una sucesión \Diamond . Vamos a ver ahora que también se pueden construir a partir de una función genérica $f : \omega \rightarrow \omega$, lo que nos da la consistencia de $\neg\text{HS} + \neg\text{HC}$.

Teorema 5.47 Si $\mathbb{P}=\text{Fn}(\omega, 2, \aleph_0)$, entonces $\mathbb{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \neg\text{HS}$.

DEMOSTRACIÓN: Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Sea $f = \bigcup G : \omega \rightarrow 2$ la función genérica, $f \in M[G]$.

En [TC 9.10] se construye una sucesión $\{s_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ de funciones inyectivas $s_\alpha : \alpha \rightarrow \omega$ con la propiedad de que si $\alpha < \beta < \omega_1$ entonces s_α y $s_\beta|_\alpha$ coinciden salvo a lo sumo en un número finito de ordinales. Consideramos una sucesión en M con estas características (que siguen cumpliéndose en $M[G]$) y definimos

$$T_f = \{(s_\alpha|_\beta) \circ f \mid \beta \leq \alpha < \omega_1\} \subset 2^{<\omega_1},$$

que es un \aleph_1 -árbol con el orden dado por la inclusión. Notemos que $\text{Niv}_\beta T_f$ está formado por las funciones $(s_\alpha)|_\beta \circ f$ para $\beta \leq \alpha < \omega_1$, pero cada $(s_\alpha)|_\beta$ se diferencia de s_β a lo sumo en un número finito de valores, por lo que $\text{Niv}_\beta T_f$ es en realidad numerable.

Observemos en general que si $X \subset \omega_1$, $X \in M[G]$ es no numerable $^{M[G]}$, entonces existe $Y \subset X$, $Y \in M$, tal que Y es no numerable M . En efecto, si $X = \sigma_G$, para cada $\alpha \in X$, existe $p_\alpha \in G$ tal que $p_\alpha \Vdash \check{\alpha} \in \sigma$, pero \mathbb{P} es numerable $^{M[G]}$, luego existe $Y_0 \subset X$ no numerable tal que todas las condiciones p_α , con $\alpha \in Y$ coinciden con una misma condición $p \in G$. En principio tenemos que $Y_0 \in M[G]$, pero

$$Y = \{\alpha \in \omega_1 \mid p \Vdash \check{\alpha} \in \sigma\} \in M$$

cumple $Y_0 \subset Y \subset X$.

Veamos que las anticadenas de T_f son numerables. Como los niveles de A son numerables, una anticadena tiene que contener elementos de una cantidad no numerable de alturas, luego restringiéndola a un elemento de cada altura viene determinada por una función $\alpha : W \subset \omega_1 \rightarrow \omega_1$, de modo que la anticadena es $\{s_{\alpha(\beta)}|_\beta \circ f \mid \beta \in W\}$. Si W es no numerable, pasando a un subconjunto podemos suponer que $W \in M$, por la propiedad que acabamos de probar. Llamemos $t_\beta = s_{\alpha(\beta)}|_\beta : \beta \rightarrow \omega$, que es una aplicación inyectiva.

Consideremos una condición $p \in \mathbb{P}$. Extendiéndola si es preciso, podemos suponer que $p \in {}^n\omega$. Para cada $\beta \in W$, sea $X_\beta = \{\delta < \beta \mid t_\beta(\delta) < n\}$, que es un conjunto finito. Por el lema de los sistemas Δ existe $W' \subset W$ tal que $\{X_\beta\}_{\beta \in W'}$ es una familia cuasidisjunta de raíz $r \subset \omega_1$ (o bien todos los X_β son iguales a r). Restringiendo aún más W podemos suponer que todos los $t_\beta|_r$ son iguales, para $\beta \in W'$.

Veamos ahora que si $\beta_1 < \beta_2$ están en W' , entonces existe $q \leq p$ tal que $t_{\beta_2}|_{\beta_1} \circ q = t_{\beta_1} \circ q$.

Para ello tomamos $m \in \omega$ que sea mayor que $t_{\beta_1}(\delta)$ y $t_{\beta_2}(\delta)$ para el número finito de ordinales δ en los que discrepan. Consideremos en m la relación dada por $k R_0 l$ si y sólo si existe un $\delta < \beta_1$ tal que $t_{\beta_1}(\delta) = k$ y $t_{\beta_2}(\delta) = l$. Notemos que si $k R_0 l$, entonces hay que definir q de modo que $q(k) = q(l)$, para que se cumpla $q(t_{\beta_2}(\delta)) = q(t_{\beta_1}(\delta))$. Sea R la relación de equivalencia en m generada por R_0 , es decir, que $k R l$ si y sólo si existe una cadena finita

$$k = k_0 R^* k_1 R^* k_2 \cdots R^* k_t = l,$$

donde R^* es R_0 o bien R^{-1} . Es claro que cualquier q que sea constante sobre las clases de equivalencia de R cumple lo pedido, salvo que tenemos que garantizar que $q \leq p$. Para ello observamos que dos elementos distintos de n no pueden estar relacionados por R_0 (o por su inversa), porque entonces tendríamos que $t_{\beta_1}(\delta) = k$ y $t_{\beta_2}(\delta) = l$ con $\delta \in X_{\beta_1} \cap X_{\beta_2} = r$, luego $k = l$. Por lo tanto, cada clase de equivalencia en m respecto de r contiene a lo sumo un elemento de n . Esto nos permite definir q asignando a cada $k < m$ el valor $q(k) = p(l)$ si existe un (único) $l < n$ tal que $l R k$, o bien $q(k) = 0$ en caso contrario.

Por lo tanto, hemos probado que el conjunto

$$D = \{q \in \mathbb{P} \mid \forall \beta_1 \beta_2 \in W (\beta_1 \neq \beta_2 \wedge$$

$\wedge \delta < \omega_1 (t_{\beta_1}(\delta) \neq t_{\beta_2}(\delta) \rightarrow t_{\beta_1}(\delta), t_{\beta_2}(\delta) \in \mathcal{D} q \wedge q(t_{\beta_1}(\delta)) = q(t_{\beta_2}(\delta)))) \in M$

es denso en \mathbb{P} , luego corta a G , lo que se traduce en que existen dos ordinales distintos $\beta_1, \beta_2 \in W$ tales que $t_{\beta_2}|_{\beta_1} \circ f = t_{\beta_1} \circ f$, pero esto significa que $s_{\alpha(\beta_1)}|_{\beta_1} \circ f \leq s_{\alpha(\beta_2)}|_{\beta_2} \circ f$, cuando suponíamos que formaban parte de una anticadena.

Veamos por último que T_f no tiene cadenas no numerables. Una cadena no numerable sería de la forma

$$\{s_{\alpha(\beta)}|_\beta \circ f \mid \beta < \omega_1\},$$

para cierta función $\alpha : \omega_1 \longrightarrow \omega_1$. Mediante una biyección $\omega_1 \times \omega_1 \longrightarrow \omega_1$ en M , podemos codificar α como un subconjunto de ω_1 , que tendrá un subconjunto no numerable en M , por lo que existe un $W \in M$, $W \subset \omega_1$ tal que la restricción $\alpha|_W : W \longrightarrow \omega_1$ está en M . Llamemos $t_\beta = s_{\alpha(\beta)}|_\beta : \beta \longrightarrow \omega$, que es una aplicación inyectiva, y $\{t_\beta\}_{\beta \in W} \in M$.

El conjunto

$$B = \{i \in \omega \mid \bigvee \beta_1 \beta_2 \in W \bigvee \delta \in \beta_1 \cap \beta_2 (\beta_1 \neq \beta_2 \wedge i = t_{\beta_1}(\delta) \neq t_{\beta_2}(\delta))\}$$

no puede estar acotado, pues si n fuera una cota superior podríamos considerar los conjuntos finitos $X_\beta = \{\delta < \beta \mid t_\beta(\delta) < n\}$, de los que podríamos extraer una familia cuasidisjunta no numerable $\{X_\beta\}_{\beta \in W'}$ de raíz r y de modo que todas las $t_\beta|_r$ fueran la misma función. Pero entonces tendríamos una aplicación inyectiva (en M):

$$\bigcup_{\beta \in W'} t_\beta : \omega_1 \longrightarrow \omega.$$

Como consecuencia, el conjunto D dado por

$$\{p \in \mathbb{P} \mid \bigvee \beta_1 \beta_2 \in W \bigvee \delta \in \beta_1 \cap \beta_2 (t_{\beta_1}(\delta), t_{\beta_2}(\delta) \in \mathcal{D}p \wedge p(t_{\beta_1}(\delta)) \neq p(t_{\beta_2}(\delta)))\}$$

es denso en \mathbb{P} , pues dada cualquier condición p , siempre podemos tomar un $i \in B$ que no esté en su dominio, para el cual existirán β_1, β_2, δ en las condiciones de la definición de B , y siempre podremos extender p sobre i (y, en su caso, sobre $j = t_{\beta_2}(\delta)$, si no está ya en $\mathcal{D}p$) para que la extensión tome valores distintos en i y en j .

Por lo tanto, este conjunto corta a G , lo cual significa que existen ordinales distintos $\beta_1 < \beta_2 < \omega_1$ y $\delta \in \beta_1 \cap \beta_2$ tales que $f(t_{\beta_1}(\delta)) \neq f(t_{\beta_2}(\delta))$, pero esto contradice a que $s_{\alpha(\beta_1)}|_{\beta_1} \circ f \leq s_{\alpha(\beta_2)}|_{\beta_2} \circ f$. ■

Como las extensiones genéricas mediante $\text{Fn}(\omega, 2, \aleph_0)$ tienen los mismos cardinales, las mismas cofinalidades y la misma función del continuo del modelo base, tenemos que $\neg\text{HS}$ es consistente con cualquier determinación de la función del continuo cuya consistencia sepamos probar. En particular, teniendo en cuenta que

$$\text{Fn}(\mu, 2, \aleph_0) \cong \text{Fn}(\mu \setminus \omega, 2, \aleph_0) \times \text{Fn}(\omega, 2, \aleph_0),$$

vemos que en las extensiones genéricas obtenidas mediante $\text{Fn}(\mu, 2, \aleph_0)$ hay árboles de Suslin.

5.8 Diamantes y la hipótesis de Kurepa

Veamos que también podemos probar la consistencia del diamante de Jensen mediante una extensión genérica:

Teorema 5.48 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, consideremos $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1)^M$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces se cumple $\Diamond^{M[G]}$. Si $(2^{\aleph_0} = \aleph_1)^M$, entonces \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades y la función del continuo es la misma en M y en $M[G]$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $X = \{(\alpha, \beta) \mid \beta < \alpha < \omega_1^M\}$ y sea $\mathbb{Q} = \text{Fn}(X, 2, \aleph_1)^M$. Como $(|X| = \aleph_1)^M$, resulta que \mathbb{P} y \mathbb{Q} son semejantes^M, luego $M[G]$ puede obtenerse también a partir de \mathbb{Q} . Así pues, supondremos que G es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M .

Como \mathbb{Q} es \aleph_1 -cerrado en M es fácil ver (usando 5.8) que $\omega_1^M = \omega_1^{M[G]}$. Por simplificar la notación escribiremos ω_1 para referirnos a este ordinal numerable (en ningún momento necesitaremos nombrar al ω_1 real). Así mismo es claro que $\mathcal{P}\omega \cap M = \mathcal{P}\omega \cap M[G]$.

Sea $f_G : \omega_1 \times \omega_1 \longrightarrow 2$ la aplicación genérica construida a partir de G (es decir, la unión de las condiciones en G). Por la definición de \mathbb{Q} es claro que si definimos $f_G^\alpha(\beta) = f(\alpha, \beta)$ entonces $f_G^\alpha : \alpha \longrightarrow 2$ (aquí usamos de forma estándar que G es genérico). Definimos los conjuntos $A_\alpha = \{\beta < \alpha \mid f_G^\alpha(\beta) = 1\}$. Puesto que $G \in M[G]$ es claro que $\{A_\alpha\}_{\alpha < \omega_1} \in M[G]$. Vamos a probar que es una sucesión \diamondsuit en $M[G]$.

En caso contrario existen $B, C \in M[G]$ tales que $B \subset \omega_1$, C es c.n.a. en ω_1 y el conjunto $\{\alpha < \omega_1 \mid B \cap \alpha = A_\alpha\}$ no corta a C . Sea $\tau_G : \omega_1 \longrightarrow 2$ la función característica de B y sea $C = \sigma_G$, con $\sigma, \tau \in M^\mathbb{Q}$. Sea Γ el nombre canónico de G definido en 4.31. Sea $p \in \mathbb{Q}$ tal que

$$p \Vdash (\tau : \omega_1 \longrightarrow 2 \wedge \sigma \text{ es c.n.a. en } \check{\omega}_1 \wedge \bigwedge \alpha \in \sigma \ \tau|_\alpha \neq f_\Gamma^\alpha).$$

Si $q \in \mathbb{Q}$, llamaremos *soporte* de q (abreviado sop q) al mínimo ordinal $\beta < \omega_1$ tal que $\mathcal{D}q \subset \{(\alpha, \delta) \mid \delta < \alpha < \beta\}$. Construimos en M sucesiones $\{p_n\}$, $\{\beta_n\}$, $\{\delta_n\}$ y $\{b_n\}$, con $n \in \omega$, de modo que

- a) $p_0 = p$,
- b) $\beta_n = \text{sop } p_n$,
- c) $\beta_n < \delta_n < \beta_{n+1}$,
- d) $p_{n+1} \leq p_n$,
- e) $p_{n+1} \Vdash \delta_n \in \sigma$,
- f) $b_n : \beta_n \longrightarrow 2$ y $p_{n+1} \Vdash \tau|_{\check{\beta}_n} = \check{b}_n$.

Esto es posible, pues si tenemos p_n , β_n , δ_{n-1} y b_{n-1} que cumplan estas propiedades, como $p_n \leq p$, tenemos que $p \Vdash \sigma$ es c.n.a. en $\check{\omega}_1$, y por consiguiente $p_n \Vdash \forall x \in \check{\omega}_1 (\check{\beta}_n < x \wedge x \in \sigma)$. Por 4.59 i) existen $q \leq p_n$ y $\delta_n \in \omega_1$ tales que $q \Vdash (\check{\beta}_n < \check{\delta}_n \wedge \check{\delta}_n \in \sigma)$.

Sea r una extensión de q con $\text{sop } r > \delta_n$. Sea $F = (\beta_n 2)^M$. Como \mathbb{Q} es \aleph_1 -cerrado en M , se cumple que $r \Vdash \tau|_{\check{\beta}_n} \in \check{F}$ o, expresado en otros términos, $r \Vdash \forall x \in \check{F} \ \tau|_{\check{\beta}_n} = x$. Aplicando de nuevo 4.59 i) tenemos que existen $b_n \in F$ y $p_{n+1} \leq r \leq p_n$ de modo que $p_{n+1} \Vdash \tau|_{\check{\beta}_n} = \check{b}_n$. Tomando $\beta_{n+1} = \text{sop } p_{n+1}$ es claro que $p_{n+1}, \beta_{n+1}, \delta_n$ y b_n cumplen las propiedades anteriores.

Como $\beta_0 < \delta_0 < \beta_1 < \delta_1 < \dots$, se cumple que las sucesiones $\{\beta_n\}$ y $\{\delta_n\}$ tienen el mismo supremo γ . Sea $p' = \bigcup_{n \in \omega} p_n \in \mathbb{Q}$. Claramente $\text{sop } p' = \gamma$ y,

como p' extiende a todas las condiciones p_n , resulta que $p' \Vdash \tau|_{\beta_n} = \check{b}_n$ para todo $n \in \omega$. Considerando una extensión por un filtro que contenga a p' concluimos que cada b_{n+1} extiende a b_n , que $b' = \bigcup_{n \in \omega} b_n$ cumple $b' : \gamma \longrightarrow 2$ y además que $p' \Vdash \tau|_{\gamma'} = b'$.

Como $\text{sopp}' = \gamma$, en p' no hay pares de la forma (γ, ϵ) , luego podemos extender p' a una condición s tal que $s(\gamma, \epsilon) = b'(\epsilon)$ para todo $\epsilon < \gamma$. De este modo $s \Vdash \tau|_{\check{\gamma}} = f_\Gamma^\gamma$. Además $s \leq p'$, luego $s \Vdash \sigma$ es c.n.a. en $\check{\omega}_1$ y para todo $n \in \omega$, se cumple que $s \Vdash \check{d}_n \in \sigma$. De aquí se sigue que $s \Vdash \check{\gamma} \in \sigma$.

En definitiva, $s \Vdash \bigvee \gamma \in \sigma \tau|_\gamma = f_\Gamma^\gamma$, cuando por otra parte $s \leq p$ y p fuerza lo contrario. Con esta contradicción queda probado $\Diamond^{M[G]}$.

Si M cumple la hipótesis del continuo entonces \mathbb{P} cumple la c.c. \aleph_2 en M y por 5.17 conserva cardinales y cofinalidades. Además, $(|\mathbb{P}| = \aleph_1)^M$, el número de anticadenas en \mathbb{P} es a lo sumo $(2^{\aleph_1})^M$ y si κ es un cardinal no numerable M , según el teorema 5.20, el número M de buenos nombres M para subconjuntos de κ es a lo sumo $((2^{\aleph_1})^\kappa)^M = (2^\kappa)^M$. Según 5.22, esto implica que $(2^\kappa)^{M[G]} \leq (2^\kappa)^M$, y la otra desigualdad es obvia. Por lo tanto la función del continuo en M es la misma que en $M[G]$. ■

De aquí deducimos que \Diamond no implica, por ejemplo, que $2^{\aleph_1} = \aleph_2$. Ahora demostramos que \Diamond no implica \Diamond^+ :

Teorema 5.49 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC+HCG, consideremos $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega_2, 2, \aleph_1)^M$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces $M[G]$ cumple HCG + \Diamond + $\neg\Diamond^+$.*

DEMOSTRACIÓN: Por 5.23 sabemos que \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades y que $M[G]$ cumple la HCG. Como sólo vamos a considerar cardinales en M y en $M[G]$, por simplicidad omitiremos las relativizaciones, de modo que, por ejemplo, ω_1 representará en lo sucesivo a $\omega_1^M = \omega_1^{M[G]}$.

Ahora observamos que en ZFC se prueba que

$$\text{Fn}(\omega_2, 2, \aleph_1) \cong \text{Fn}(\omega_2 \setminus \omega_1, 2, \aleph_1) \times \text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1) \cong \text{Fn}(\omega_2, 2, \aleph_1) \times \text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1).$$

Por lo tanto, $\mathbb{P} \cong^M \mathbb{P} \times \mathbb{Q}$, donde $\mathbb{Q} = \text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1)^M$, y por el teorema del producto, $M[G] = M[G_1][G_2]$, donde G_1 es \mathbb{P} -genérico sobre M y G_2 es \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G_1]$. En particular $M[G_1]$ cumple la HCG.

Como \mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado en M , es claro que $\mathbb{Q} = \text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1)^{M[G_1]}$, por lo que el teorema anterior nos da $\Diamond^{M[G]}$. Veamos ahora $\neg(\Diamond^+)^{M[G]}$.

Supongamos que $\{S_\alpha\}_{\alpha < \omega_1} \in M[G]$ es una sucesión \Diamond^+ en $M[G]$. Por el teorema 5.8, si $A \subset \alpha < \omega_1$, con $A \in M[G]$, de hecho $A \in M$, luego, para cada $\alpha < \omega_1$, tenemos que $S_\alpha \subset M$. Más aún, como $(|S_\alpha| < \omega_1)^{M[G]}$, también $S_\alpha \in M$. Por lo tanto, $S : \omega_1 \longrightarrow ([\omega_1]^{<\aleph_1})^M$, luego $S = \sigma_G$, donde $\sigma \in M^{\mathbb{P}}$ es un buen nombre para un subconjunto de (el nombre canónico de) $(\omega_1 \times [\omega_1]^{<\aleph_1})^M$.

Este conjunto tiene cardinal \aleph_1 en M , luego (siempre en M) se cumple que $\mathcal{R}\sigma$ es una unión de \aleph_1 anticadenas de \mathbb{P} , todas las cuales tienen a lo sumo cardinal \aleph_1 , luego $|\mathcal{R}\sigma| \leq \aleph_1$, y $\mathcal{D}\sigma$ está formado por \aleph_1 nombres canónicos. Por otra parte, para cada $\alpha < \omega_1$ existe $p_\alpha \in G$ tal que $p_\alpha \Vdash \sigma(\check{\alpha}) = \check{S}_\alpha$. La elección de los p_α se hace en $M[G]$, y nos permite encontrar un ordinal $\theta < \omega_2$ tal que tanto σ como todos los p_α son \mathbb{Q} -nombres, donde $\mathbb{Q} = \text{Fn}(\theta, 2, \omega_1)^M$.

Ahora usamos que, en M , se cumple $\mathbb{P} \cong \mathbb{Q} \times \mathbb{P}'$, donde $\mathbb{P}' = \text{Fn}(\omega_2 \setminus \theta, 2, \omega_1)$, por lo que $M[G] = M[G_1][G_2]$, donde $G_1 = G \cap \mathbb{Q}$ es \mathbb{Q} -genérico sobre M y $G_2 = G \cap \mathbb{P}'$ es \mathbb{P}' -genérico sobre $M[G_1]$.

Tenemos entonces que $p_\alpha \in G \cap \mathbb{Q} = G_1$, y el teorema 4.48 (apartado a) nos da que $p_\alpha \Vdash_{\mathbb{Q}} \sigma(\check{\alpha}) = \check{S}_\alpha$, luego $S = \sigma_{G_1} \in M[G_1]$.

Por otra parte, en $M[G_1]$ se cumple que $\mathbb{P}' \cong \text{Fn}(\omega_2, 2, \aleph_1)^{M[G_1]} = \mathbb{P}$, donde la última igualdad se debe a que \mathbb{Q} es \aleph_1 -cerrado en M . Por lo tanto, $M[G]$ es también una extensión genérica de $M[G_1]$ a través de un filtro \mathbb{P} -genérico sobre $M[G_1]$. Por lo tanto, cambiando M por $M[G_1]$ podemos suponer sin pérdida de generalidad que $\{S_\alpha\}_{\alpha < \omega_1} \in M$.

Pasamos ya a probar que no cumple $(\Diamond^+)^{M[G]}$. Para ello consideramos $f_G = \bigcup G : \omega_2 \longrightarrow 2$ y $A = \{\delta < \omega_1 \mid f_G(\delta) = 1\} \subset \omega_1$. Si la sucesión cumpliera $(\Diamond^+)^{M[G]}$ existiría un $C \in M[G]$, c.n.a. en ω_1 , tal que

$$\bigwedge \alpha \in C \ A \cap \alpha \in S_\alpha.$$

Pongamos que $C = \tau_G$ y sea $p_0 \in G$ tal que $p_0 \Vdash \tau$ no está acotado en $\check{\omega}_1$. Sea

$$D = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall \alpha < \omega_1 (p \Vdash \check{\alpha} \in \tau \wedge \alpha \subset \mathcal{D}p \wedge \{\delta \in \alpha \mid p(\delta) = 1\} \notin S_\alpha)\} \in M.$$

Basta probar que D es denso bajo p_0 , pues entonces existe un $p \in D \cap G$, lo que se traduce a su vez en que existe un $\alpha \in C$ tal que $A \cap \alpha \notin S_\alpha$.

En efecto, razonando en M , tomamos $q \leq p_0$ y tenemos que encontrarle una extensión en D . Como q es numerable M , existe un $\beta < \omega_1$ tal que $\omega_1 \cap \mathcal{D}q < \beta$. Como $q \Vdash \forall \alpha < \check{\omega}_1 (\check{\beta} + \omega < \alpha \wedge \alpha \in \tau)$, existe un α tal que $\beta + \omega < \alpha < \omega_1$ y $q \Vdash \check{\alpha} \in \tau$, y cualquier extensión $p \leq q$ cumplirá también $p \Vdash \check{\alpha} \in \tau$.

Consideramos todas las extensiones $p \leq q$ que cumplen $\alpha \subset \mathcal{D}p$. Teniendo en cuenta que $\alpha \setminus \beta$ es infinito, es claro que los conjuntos $\{\delta \in \alpha \mid p(\delta) = 1\}$ que se forman con todas ellas forman una familia no numerable, mientras que S_α es numerable, por lo que es posible elegir una extensión p que cumpla $p \in D$. ■

Notemos que en realidad con el teorema anterior hemos demostrado la consistencia de $\text{HCG} + \Diamond + \neg \Diamond^*$. Seguidamente construimos un modelo en el que no se cumple la hipótesis de Kurepa. Según 3.41, el modelo deberá cumplir que \aleph_2 es inaccesible L , y sucede que el modelo natural para conseguir esto basta para conseguir $\neg \text{HK}$:

Teorema 5.50 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y sea κ un cardinal inaccesible M , sea $\mathbb{P} = \text{Lv}(\kappa, \aleph_1)^M$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces en $M[G]$ no hay árboles de Kurepa.*

DEMOSTRACIÓN: Por 5.44 sabemos que \mathbb{P} conserva \aleph_1 y los cardinales y cofinalidades $\geq \kappa$, mientras que todos los cardinales $\aleph_1 < \nu < \kappa$ se colapsan. En particular, $\aleph_1^{M[G]} = \aleph_1^M$, $\aleph_2^{M[G]} = \kappa$. Por 5.45 sabemos que si M cumple la HCG, también la cumple $M[G]$. Además tenemos que, en M , \mathbb{P} cumple la c.c. κ y es \aleph_1 -cerrado.

Sea (A, \leq) un \aleph_1 -árbol $^{M[G]}$, es decir, un árbol de altura \aleph_1 y cuyos niveles tienen todos cardinal menor que \aleph_1 (todo ello en $M[G]$). Es claro entonces que su cardinal es \aleph_1 , luego, pasando a otro árbol semejante, podemos suponer sin pérdida de generalidad que es de la forma $(A, \leq) = (\omega_1^M, R)$, con $R \subset \omega_1^M \times \omega_1^M$.

Sea $R = \sigma_G$, donde $\sigma \in M^\mathbb{P}$ es un buen nombre para un subconjunto de (el nombre canónico de) $\omega_1^M \times \omega_1^M$. Entonces, en M , el rango de σ es la unión de \aleph_1 anticadenas, todas ellas de cardinal $< \kappa$, luego $|\mathcal{R}\sigma| < \kappa$. Como κ es regular, existe un $\theta < \kappa$ tal que $\mathcal{R}\sigma \subset M^{\mathbb{P}_0}$, donde

$$\mathbb{P}_0 = \{p \in \mathbb{P} \mid \mathcal{D}p \subset \theta \times \omega_1\}^M, \quad \mathbb{P}_1 = \{p \in \mathbb{P} \mid \mathcal{D}p \subset (\kappa \setminus \theta) \times \omega_1\}^M.$$

Claramente, en M tenemos una semejanza obvia $\mathbb{P} \cong \mathbb{P}_0 \times \mathbb{P}_1$, de modo que $G_0 = G \cap \mathbb{P}_0$ es un filtro \mathbb{P}_0 -genérico sobre M y $G_1 = G \cap \mathbb{P}_1$ es \mathbb{P}_1 -genérico sobre $M[G_0]$, y $M[G] = M[G_0][G_1]$. Además $R = \sigma_G = \sigma_{G_0}$, con lo que $R \in M[G_0]$.

Observemos que $\aleph_1^M = \aleph_1^{M[G_0]}$ (porque se conserva en $M[G]$) y que κ es inaccesible $^{M[G_0]}$. En efecto, en M se cumple que \mathbb{P}_0 cumple la condición de cadena $|\mathbb{P}_0|^+ = |\theta|^+ < \kappa$, luego conserva cardinales y cofinalidades $\geq \theta^+$, luego κ sigue siendo débilmente inaccesible en $M[G_0]$. Además, si $\mu < \kappa$ es un cardinal $^{M[G_0]}$, el número de buenos nombres (en M) para subconjuntos de $\check{\mu}$ es $< \kappa$ (por 5.20), luego por 5.22 tenemos que $(2^\mu)^{M[G_0]} < \kappa$, luego κ es fuertemente inaccesible $^{M[G_0]}$.

Por otra parte, como \mathbb{P}_0 es claramente \aleph_1 -cerrado en M , sucede que

$$\mathbb{P}_1 = \{p \in \mathbb{P} \mid \mathcal{D}p \subset (\kappa \setminus \theta) \times \omega_1\}^{M[G_0]},$$

luego \mathbb{P}_1 es \aleph_1 -cerrado en $M[G_0]$. En resumen, cambiando M por $M[G_0]$, \mathbb{P} por \mathbb{P}_1 y G por G_1 tenemos que la extensión genérica con la que estamos trabajando puede expresarse como $M[G]$, donde G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , donde a su vez \mathbb{P} es un c.p.o. (\aleph_1 -cerrado) M , $\aleph_1^M = \aleph_1^{M[G]}$ y $\kappa = \aleph_2^{M[G]}$ es inaccesible M . Además, ahora tenemos que el \aleph_1 -árbol (A, \leq) que estamos considerando cumple $(A, \leq) \in M$. Basta probar que, en estas circunstancias, el número de caminos de (A, \leq) en $M[G]$ es $< \kappa$.

A su vez, para probar esto es suficiente demostrar que todo camino de A está en M , pues entonces el número de caminos será a lo sumo $|\mathcal{P}A|^M = (2^{\aleph_1})^M < \kappa$.

Sea $C \in M[G]$ un camino en A y supongamos que $C \notin M$. Sea $P = (\mathcal{P}A)^M$, con lo que $C \notin P$. Sea $C = \tau_G$ y sea $p \in \mathbb{P}$ tal que

$$p \Vdash (\text{τ es un camino en \check{A}} \wedge \tau \notin \check{P}).$$

A partir de aquí trabajamos en M . Si $\alpha < \omega_1$ y $q \in \mathbb{P}$, escribiremos

$$q \parallel \tau_\alpha \equiv \forall b \in \text{Niv}_\alpha A \ q \Vdash \check{b} \in \tau.$$

Informalmente, $q \parallel \tau_\alpha$ significa que la condición q determina cual es el α -ésimo elemento del camino nombrado por τ .

- a) El conjunto $\{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge q \parallel \tau_\alpha\}$ es denso bajo p .

En efecto, si $r \leq p$ y G es un filtro \mathbb{P} -genérico tal que $r \in G$, entonces τ_G es un camino en A , luego existe un $b \in \text{Niv}_\alpha(A)$ tal que $b \in \tau_G$, luego existe un $q \leq r$ tal que $q \Vdash \check{b} \in \tau$, luego $q \parallel \tau_\alpha$.

- b) $\bigwedge q \leq p \bigvee \alpha < \omega_1 \neg q \parallel \tau_\alpha$.

En caso contrario, existiría un $q \leq p$ tal que, para todo $\alpha < \omega_1$ existiría un $b_\alpha \in \text{Niv}_\alpha(A)$ tal que $q \Vdash \check{b}_\alpha \in \tau$, pero llamando $B = \{b_\alpha \mid \alpha < \omega_1\}$ tendríamos entonces que $q \Vdash \tau = \check{B}$, luego $q \Vdash \tau \in \check{P}$, en contradicción con que p fuerza lo contrario.

- c) $\bigwedge \alpha < \omega_1 \bigwedge q \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge \alpha < \beta \wedge q \parallel \tau_\beta \rightarrow q \parallel \tau_\alpha)$.

Si $b \in \text{Niv}_\beta(A)$, $q \Vdash \check{b} \in \tau$ y $a \in A$ es el único $a \in \text{Niv}_\alpha(A)$ que cumple $a \leq b$, es claro que $q \Vdash \check{a} \in \tau$.

Ahora es claro que si $q \leq p$ entonces $\delta(q) = \{\alpha < \omega_1 \mid q \parallel \tau_\alpha\}$ es un ordinal numerable, el mínimo ordinal δ tal que $\neg q \parallel \tau_\delta$.

- d) Si $q \leq p$ y $\delta(q) < \alpha < \omega_1$, existen $q_0, q_1 \leq q$ y $a_0, a_1 \in \text{Niv}_\alpha(A)$, $a_0 \neq a_1$, tales que $q_i \Vdash \check{a}_i \in \tau$.

En efecto, tenemos que $\neg q \parallel \tau_\alpha$, pero por a) existe un $q_0 \leq q$ y un $a_0 \in \text{Niv}_\alpha(A)$ tal que $q_0 \Vdash \check{a}_0 \in \tau$, pero $\neg q \Vdash \check{a}_0 \in \tau$, luego existe un $r \leq q$ tal que $r \Vdash \check{a}_0 \notin \tau$. De nuevo por a) existe un $q_1 \leq r$ y un $a_1 \in \text{Niv}_\alpha(A)$ tal que $q_1 \Vdash \check{a}_1 \in \tau$, y necesariamente $a_1 \neq a_0$.

Es claro entonces que podemos construir recurrentemente tres sucesiones $\{p_s\}_{s \in 2^{<\omega}}, \{a_s\}_{s \in 2^{<\omega}}$ y $\{\alpha_n\}_{n \in \omega}$ tales que:

- $p_\emptyset = p$,
- $\alpha_0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots$
- $\alpha_n > \max\{\delta(p_s) \mid s \in 2^{\leq n}\}$,
- Para todo $s \in 2^{<\omega}$ tal que $\ell(s) = n$, se cumple $a_{s^\frown 0} \neq a_{s^\frown 1}, p_{s^\frown i} \leq p_s, a_{s^\frown i} \in \text{Niv}_{\alpha_n}(A)$ y $p_{s^\frown i} \Vdash \check{a}_{s^\frown i} \in \tau$.

Sea $\alpha = \bigcup_n \alpha_n < \omega_1$. Para cada $f \in 2^\omega$, como la sucesión $\{p_{f|_n}\}_{n \in \omega}$ es decreciente y \mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado, existe $p_f \in \mathbb{P}$ tal que $\bigwedge n \in \omega p_f \leq p_{f|_n}$. Por a) existen $q_f \leq p_f$ y $a_f \in \text{Niv}_\alpha(A)$ de modo que $q_f \Vdash \check{a}_f \in \tau$. Como $q_f \Vdash \check{a}_{f|_n} \in \tau$, se cumple que $a_{f|_n} \leq a_f$. Pero si $f \neq g$, entonces existe un n tal que $f|_n = g|_n$ y $f(n) \neq g(n)$, en cuyo caso $a_{f|_{n+1}} \neq a_{g|_{n+1}}$, luego $a_f \neq a_g$.

En definitiva, el conjunto $\{a_f \mid f \in 2^{<\omega}\} \subset \text{Niv}_\alpha(A)$ tiene cardinal 2^{\aleph_0} , en contradicción con que los niveles de A son numerables. ■

Con esto queda probado que la hipótesis de Kurepa no es ni demostrable ni refutable en ZFC.

Nota En el modelo construido en el teorema anterior se cumple \Diamond , por lo que podemos concluir que \Diamond no basta para demostrar HK. En efecto, basta observar que

$$\mathbb{P} = \text{Lv}(\kappa, \aleph_1) \cong \mathbb{Q} \times \text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1),$$

donde $\mathbb{Q} = \{p \in \mathbb{P} \mid p \cap (\{2\} \times \omega_1 \times 2) = \emptyset\}$, donde la semejanza es la dada por $p \mapsto (p_1, p_2)$, donde

$$p_1 = \{(\alpha, \beta, \gamma) \in p \mid \alpha \neq 2\}, \quad p_2 = \{(\beta, \gamma) \in \omega_1 \times 2 \mid (2, \beta, \gamma) \in p\}.$$

Por lo tanto, $M[G] = M[G_1][G_2]$, donde G_1 es \mathbb{Q} -genérico sobre M y G_2 es $\text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1)^M$ -genérico sobre $M[G_1]$. Ahora bien, como \mathbb{Q} es \aleph_1 -cerrado en M , se cumple que $\text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1)^M = \text{Fn}(\omega_1, 2, \aleph_1)^{M[G_1]}$, y basta aplicar 5.48. ■

Capítulo VI

La independencia del axioma de elección

Ya hemos demostrado que si ZF es consistente, también lo es ZFC, puesto que hemos probado la consistencia de $ZF + V = L$, y el axioma de constructibilidad implica el axioma de elección. En este capítulo mostraremos varios ejemplos de teoremas de ZFC que no pueden demostrarse en ZF. No obstante, empezaremos dando otra prueba alternativa de la consistencia del axioma de elección (también debida a Gödel) basada en otro modelo distinto de L que tiene gran interés en la teoría de conjuntos. Naturalmente, en este capítulo trabajamos en ZF.

6.1 Conjuntos hereditariamente definibles por ordinales

Para definir los conjuntos constructibles hemos introducido el concepto de subconjunto definible de un conjunto dado X , que es un conjunto de la forma

$$\{x \in X \mid \phi^X(x, x_1, \dots, x_n)\},$$

donde $x_1, \dots, x_n \in X$. Aquí se entiende que ϕ es una fórmula metamatemática, pero en la definición “real” del conjunto de partes definibles necesitamos considerar las fórmulas definidas en ZF, de modo que los subconjuntos definibles de X son en realidad de la forma

$$\{x \in X \mid X \models \phi[x, x_1, \dots, x_n]\}.$$

El considerar fórmulas relativizadas a X (o su equivalente formal, consistente en usar $X \models \phi$) era justo lo que necesitábamos en ese contexto, en el que nuestro objetivo era definir “nuevos” conjuntos a partir de conjuntos “ya definidos”, de modo que la definición no debía involucrar más conjuntos que los ya contenidos en X . Sin embargo, podemos plantearnos estudiar los conjuntos definibles “en general”, a partir de conjuntos cualesquiera, sin restringir la definición a un

conjunto de conjuntos “previamente definidos”. Esto supondría considerar como conjuntos definibles a todos los conjuntos a que admiten una definición de la forma

$$\bigwedge x(x = a \leftrightarrow \phi(x, x_1, \dots, x_n)).$$

Ahora bien, aquí es fundamental precisar qué parámetros x_1, \dots, x_n admitimos, porque si admitimos conjuntos arbitrarios como parámetros, nos encontramos con que todo conjunto es definible a partir de sí mismo, considerando la fórmula $\phi(x, a) \equiv x = a$ y la definibilidad se vuelve trivial. La alternativa más restrictiva sería no admitir parámetros, de modo que un conjunto a es definible si y sólo si existe una fórmula (metamatemática) $\phi(x)$ tal que

$$\bigwedge x(x = a \leftrightarrow \phi(x)).$$

Ciertamente, hay muchos conjuntos que cumplen esta propiedad (todos los que tienen una definición en el sentido usual, como \emptyset , ω , etc.) Sin embargo, este concepto de definibilidad no es formalizable en ZFC, porque no podemos expresar lo de “existe una fórmula metamatemática”, y si tratamos de sustituir las fórmulas metamatemáticas por fórmulas definidas en ZF no sabemos expresar $\phi(x)$, ya que lo más que podemos escribir en su lugar es $X \models \phi[x]$, pero eso involucra ya un parámetro X y acabaríamos llegando al concepto de subconjunto definible que ya hemos estudiado.

No es sorprendente que tengamos problemas a la hora de definir formalmente la definibilidad, porque si pudiéramos hacerlo, como sólo hay una cantidad numerable de fórmulas de \mathcal{L}_{tc} , podríamos probar que sólo hay una cantidad numerable de conjuntos definibles, luego podríamos demostrar que hay conjuntos no definibles, mientras que ya hemos probado que existen modelos de ZFC en los que todos los conjuntos son definibles.¹

Sin embargo, Gödel demostró que es posible llegar a un concepto fructífero de definibilidad (formalizable en ZF, pero no trivial) consistente en admitir como parámetros los ordinales. Así pues, la idea es estudiar los conjuntos a “definibles por ordinales” en el sentido de que existen ordinales $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ de modo que

$$\bigwedge x(x = a \leftrightarrow \phi(a, \alpha_1, \dots, \alpha_n)),$$

para una cierta fórmula metamatemática ϕ . Aparentemente tenemos el mismo problema de antes, y es que no podemos formalizar lo de “existe una fórmula metamatemática”, pero veremos en este caso podemos esquivar el problema.

Definición 6.1 Se dice que un conjunto a es *definible por ordinales* si existen $\beta > \text{rang}(a)$, $n \in \omega$, $s \in \beta^n$ y $R \in \text{Df}(V_\beta, n+1)$ tales que

$$\bigwedge x \in V_\beta(x = a \leftrightarrow s \cap x \in R).$$

Llamaremos $D(\Omega)$ a la clase de todos los conjuntos definibles por ordinales.

¹Notemos que no hay ningún problema en definir el concepto de conjunto definible en un modelo, cosa que ya hicimos justo antes del teorema 3.27. El problema está en definir un concepto de “definibilidad” mediante una fórmula “ x es definible” con la propiedad de que si M es un modelo de ZFC entonces $\bigwedge a \in M (M \models [a] \text{ es definible} \leftrightarrow a \text{ es definible en } M)$, donde en la parte izquierda “definible” es el concepto de existencia dudosa y en la parte derecha es el que ya tenemos definido.

En lugar de R , podemos tomar una fórmula $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$ y escribir la condición en la forma

$$\bigwedge x \in V_\beta (x = a \leftrightarrow V_\beta \models \phi[s, x]).$$

De este modo, un conjunto es definible por ordinales si en un V_β suficientemente grande puede definirse mediante una fórmula cuyos parámetros sean ordinales. La introducción de V_β es un tecnicismo para evitar el problema de que $V \models \phi[s, x]$ no puede definirse en ZFC. No obstante, aunque técnicamente es imprescindible, en el fondo es redundante, pues todo conjunto definible mediante una fórmula (metamatemática) con parámetros en Ω está en $D(\Omega)$:

Teorema 6.2 *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n, x)$ una fórmula (metamatemática) con a lo sumo las variables libres indicadas. Entonces*

$$\bigwedge \alpha_1 \cdots \alpha_n a (\bigwedge x (x = a \leftrightarrow \phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, x)) \rightarrow a \in D(\Omega)).$$

DEMOSTRACIÓN: Fijemos $\alpha_1, \dots, \alpha_n, a$ y supongamos

$$\bigwedge x (x = a \leftrightarrow \phi(\alpha_1, \dots, \alpha_n, x)).$$

Por el teorema de reflexión [LM 12.29] existe $\beta > \max\{\alpha_1, \dots, \alpha_n, \text{rang}(a)\}$ tal que ϕ es absoluta para $V_\beta - V$. Esto implica que

$$\bigwedge x \in V_\beta (x = a \leftrightarrow \phi^{V_\beta}(\alpha_1, \dots, \alpha_n, x)).$$

Si llamamos

$$R = \{t \in V_\beta^{n+1} \mid \phi^{V_\beta}(t(0), \dots, t(n))\} = \{t \in V_\beta^{n+1} \mid V_\beta \models \lceil \phi \rceil[t]\},$$

(donde $\lceil \phi \rceil \in \text{Form}(\mathcal{L})$ es la fórmula que representa a la fórmula metamatemática ϕ) se cumple que $R \in D(V_\beta, n+1)$ y, llamando

$$s = (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in \beta^n.$$

tenemos que

$$\bigwedge x \in V_\beta (x = a \leftrightarrow s \cap x \in R),$$

luego $a \in D(\Omega)$. ■

De este modo hemos probado que $D(\Omega)$ contiene a todos los conjuntos definibles mediante una fórmula metamatemática con parámetros ordinales, es decir, a todos los conjuntos que queríamos considerar definibles por ordinales. Pronto demostraremos el recíproco.

Observemos que el teorema anterior aplicado a la fórmula $\phi \equiv x = \alpha$ nos da que $\Omega \subset D(\Omega)$. En particular, vemos que $D(\Omega)$ es una clase propia.

Si consideramos la fórmula $\phi(\alpha, x) \equiv \bigwedge u (u \in x \leftrightarrow u \subset \alpha)$ concluimos que $\mathcal{P}\alpha \in D(\Omega)$. En cambio, no podemos asegurar que $\mathcal{P}\omega \subset D(\Omega)$, pues que podamos definir $\mathcal{P}\omega$ no significa que podamos definir todos y cada uno de los subconjuntos de ω . En otras palabras, no está claro que la clase $D(\Omega)$ sea transitiva.

Antes de ocuparnos de ésta y otras cuestiones, introducimos una extensión debida a Solovay de la clase $D(\Omega)$ porque su tratamiento es totalmente paralelo, así que merece la pena considerar las dos a la vez:

Definición 6.3 Se dice que un conjunto a es *definible por una sucesión de ordinales* si existen $s \in \Omega^\omega$, $\beta > \max\{\text{rang}(a), \text{rang}(s)\}$, $n \in \omega$ y $R \in Df(V_\beta, 2)$ tales que

$$\bigwedge x \in V_\beta (x = a \leftrightarrow (s, x) \in R).$$

Llamaremos $D(\Omega^\omega)$ a la clase de todos los conjuntos definibles por sucesiones de ordinales.

La demostración de 6.2 se adapta fácilmente para el caso en que $D(\Omega)$ se sustituye por $D(\Omega^\omega)$, aunque una adaptación aún más directa de la prueba nos da el teorema siguiente:

Teorema 6.4 *Sea $\phi(s, x)$ una fórmula (metamatemática) con a lo sumo las variables libres indicadas. Entonces*

$$\bigwedge s \in \Omega^\omega \bigwedge a (\bigwedge x (x = a \leftrightarrow \phi(s, x)) \rightarrow a \in D(\Omega^\omega)).$$

Por ejemplo, con $\phi \equiv x = s$ obtenemos que $\Omega^\omega \subset D(\Omega^\omega)$, mientras que con $\phi \equiv x = s(0)$ obtenemos que $\Omega \subset D(\Omega^\omega)$. No sería difícil probar que $D(\Omega) \subset D(\Omega^\omega)$, pero un poco más adelante será inmediato.

También se cumple $\mathcal{P}\omega \in D(\Omega^\omega)$, pero en este caso podemos añadir que $\mathcal{P}\omega \subset D(\Omega^\omega)$. En efecto, dado $a \in \mathcal{P}\omega$, aplicamos el teorema anterior a la sucesión $s = \chi_a \in \Omega^\omega$ y la fórmula $\phi(s, x) \equiv \bigwedge u (u \in x \leftrightarrow u \in \omega \wedge s(u) = 1)$, con lo que concluimos que $a \in D(\Omega^\omega)$.

Podemos suponer que los signos del lenguaje \mathcal{L}_{tc} de la teoría de conjuntos son números naturales, y entonces $\text{Form}(\mathcal{L}_{tc}) \subset \omega^{<\omega}$. Esto da sentido a la definición siguiente:

Definición 6.5 Si $s \in \Omega^{<\omega}$ (resp. $s \in \Omega^\omega$), definimos $E_\Omega(s)$ (resp. $E_{\Omega^\omega}(s)$) como sigue:

- a) Si $s = (\beta, k)^\frown \phi^\frown t$, donde $\beta \in \Omega$, $k \in \omega$, $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$ con $n + 1$ (resp. 2) variables libres, $\ell(\phi) = k$, $t \in \Omega^n$ (resp. $t \in \Omega^\omega$) y existe un (necesariamente único) $a \in V_\beta$ tal que

$$\bigwedge x \in V_\beta (x = a \leftrightarrow V_\beta \models \phi[t, x]),$$

entonces $E(s) = a$.

- b) Si no se dan las condiciones anteriores, $E(s) = \emptyset$.

Teniendo en cuenta que, evidentemente, $\emptyset \in D(\Omega) \cap D(\Omega^\omega)$, es obvio que

$$D(\Omega) = \{E_\Omega(s) \mid s \in \Omega^{<\omega}\}, \quad D(\Omega^\omega) = \{E_{\Omega^\omega}(s) \mid s \in \Omega^\omega\}.$$

En el caso de $D(\Omega)$ podemos simplificar un poco la representación observando que $\Omega^{<\omega}$ se puede biyectar con Ω . Para ello definimos en $\Omega^{<\omega}$ el orden dado por $s < t$ si y sólo si

- a) $\max s < \max t$ (donde, si $\ell(s) = n$, representamos $\max s = \max s[n]$) o
- b) $\max s = \max t \wedge \ell(s) < \ell(t)$ o
- c) $\max s = \max t \wedge \ell(s) = \ell(t) \wedge \forall k < \ell(s) (s|_k = t|_k \wedge s(k) < t(k))$.

Es fácil ver que este orden es un buen orden en el que los segmentos iniciales son conjuntos, por lo que existe una única semejanza $F : \Omega \longrightarrow \Omega^{<\omega}$. Si llamamos E_Ω a la composición de F con el E_Ω definido previamente tenemos aplicaciones suprayectivas

$$E_\Omega : \Omega \longrightarrow D(\Omega), \quad E_{\Omega^\omega} : \Omega^\omega \longrightarrow D(\Omega^\omega).$$

Notemos que hemos definido explícitamente ambas funciones, con lo que tenemos fórmulas (metamatemáticas)

$$\Phi_\Omega(\alpha, x) \equiv \alpha \in \Omega \wedge x = E_\Omega(\alpha), \quad \Phi_{\Omega^\omega}(s, x) \equiv s \in \Omega^\omega \wedge x = E_{\Omega^\omega}(s)$$

de modo que, para todo $a \in D(\Omega)$ existe un $\alpha \in \Omega$ tal que

$$\bigwedge x(x = a \leftrightarrow \Phi_\Omega(\alpha, x)), \tag{6.1}$$

e igualmente con Ω^ω , con lo que tenemos recíprocos de los teoremas 6.2 y 6.4, es decir, todo conjunto definible por ordinales o sucesiones de ordinales se puede definir mediante una fórmula metamatemática explícita (la misma para todos), lo cual nos libera del problema de tener que expresar “existe una fórmula metamatemática” en el lenguaje \mathcal{L}_{tc} . No necesitamos decir “existe una fórmula” porque podemos usar una misma fórmula explícita en todos los casos. Con esto queda demostrado que las clases que hemos definido son exactamente las clases que pretendíamos definir.

Más aún, ahora es fácil probar lo siguiente:

Teorema 6.6 $V = D(\Omega) \rightarrow AE$.

DEMOSTRACIÓN: Un poco más en general, podemos probar que, al igual que sucede con la clase L , existe una fórmula (metamatemática) $x \leq y$ con x e y como únicas variables libres, que (en ZF) determina un buen orden de la clase $D(\Omega)$. En efecto, basta tomar

$$x \leq y \equiv \bigvee \alpha (x = E_\Omega(\alpha) \wedge \bigwedge \beta < \alpha y \neq E_\Omega(\beta)).$$

Esto significa que x es menor o igual que y si el menor ordinal que define a x es menor o igual que el menor ordinal que define a y o, equivalentemente, si x aparece antes que y en la enumeración de $D(\Omega)$ determinada por E_Ω .

Claramente, esta fórmula cumple lo requerido. En particular, si suponemos $V = D(\Omega)$ tenemos un buen orden sobre la clase universal V , lo cual implica a su vez el axioma de elección. ■

No obstante, con esto no tenemos probada la consistencia del axioma de elección si no demostramos la consistencia de $V = D(\Omega)$. Veamos primeramente algunas propiedades elementales de la clase $D(\Omega)$:

Teorema 6.7 *Se cumple:*

- a) $\Omega \subset D(\Omega)$.
- b) Si $u, v \in D(\Omega)$, entonces $\{u, v\} \in D(\Omega)$.
- c) Si $u \in D(\Omega)$, entonces $\bigcup_{x \in u} x, \mathcal{P}u \in D(\Omega)$.

Todo esto vale también para $D(\Omega^\omega)$ y además $\Omega^\omega \subset D(\Omega^\omega)$, $D(\Omega) \subset D(\Omega^\omega)$.

DEMOSTRACIÓN: Ya hemos visto que $\Omega \subset D(\Omega) \cap D(\Omega^\omega)$ y que $\Omega^\omega \subset D(\Omega^\omega)$. La última inclusión se debe a que si $a \in D(\Omega)$ existe un $\alpha \in \Omega$ que cumple (6.1), luego, llamando $s \in \Omega^\omega$ a la sucesión constante igual a α ,

$$\bigwedge x(x = a \leftrightarrow \phi(s, x)),$$

donde $\phi(s, x) \equiv \Phi_\Omega(s(0), x)$, luego $a \in D(\Omega^\omega)$, por 6.4.

b) Si u, v cumplen (6.1) con ordinales α_1 y α_2 respectivamente, entonces podemos aplicar a $\{u, v\}$ el teorema 6.2 con

$$\phi(\alpha_1, \alpha_2, x) \equiv \bigwedge y(y \in x \leftrightarrow \Phi_\Omega(\alpha_1, y) \vee \Phi_\Omega(\alpha_2, y)).$$

En el caso de Ω^ω tenemos $s_0, s_1 \in \Omega^\omega$, y entonces tomamos

$$\phi(s, x) \equiv \bigwedge y(y \in x \leftrightarrow \Phi_\Omega(s_0, y) \vee \Phi_\Omega(s_1, y)).$$

donde $s_i(n) = s(2n + i)$.

Las dos afirmaciones de c) son similares. Demostramos la segunda: Si u cumple (6.1) con un ordinal α , entonces podemos aplicar a $\mathcal{P}u$ el teorema 6.2 con

$$\phi(\alpha, x) \equiv \bigvee z(\Phi_\Omega(\alpha, z) \wedge x = \mathcal{P}z).$$

Para Ω^ω basta cambiar α por una sucesión s . ■

Todo esto apunta hacia la posibilidad de que $D(\Omega)$ sea un modelo transitivo de ZFC, pero enseguida veremos que no es posible demostrar que cumpla el axioma de extensionalidad, lo cual a su vez está relacionado con que la clase $D(\Omega)$ no es necesariamente transitiva. Para comprender la situación conviene considerar la definición siguiente:

Definición 6.8 Diremos que un conjunto a es *hereditariamente definible por ordinales* (resp. *por sucesiones de ordinales*) si $a \in D(\Omega)$ y $\text{ct}(a) \subset D(\Omega)$ (resp. si $a \in D(\Omega^\omega)$ y $\text{ct}(a) \subset D(\Omega^\omega)$). Llamaremos $\text{HD}(\Omega)$ y $\text{HD}(\Omega^\omega)$ a las clases de los conjuntos hereditariamente definibles por ordinales y sucesiones de ordinales, respectivamente.

Así pues, un conjunto es hereditariamente definible por ordinales si es definible por ordinales, y sus elementos son definibles por ordinales, y los elementos de sus elementos también lo son, etc.

Las inclusiones siguientes son inmediatas:

$$\Omega \subset \text{HD}(\Omega) \subset \text{D}(\Omega), \quad \Omega, \Omega^\omega \subset \text{HD}(\Omega^\omega) \subset \text{D}(\Omega^\omega), \quad \text{HD}(\Omega) \subset \text{HD}(\Omega^\omega).$$

Además, $\text{HD}(\Omega)$ y $\text{HD}(\Omega^\omega)$ son claramente clases transitivas. Esto a su vez implica el siguiente hecho elemental, que enunciamos para referencias posteriores:

Teorema 6.9 *Si $a \in \text{D}(\Omega)$ y $a \subset \text{HD}(\Omega)$ entonces $a \in \text{HD}(\Omega)$, y lo mismo vale para Ω^ω .*

El teorema siguiente muestra que considerar clases de conjuntos hereditariamente definibles es imprescindible si queremos obtener modelos de ZF:

Teorema 6.10 *Las afirmaciones siguientes son equivalentes:*

- a) $\text{D}(\Omega)$ cumple el axioma de extensionalidad.
- b) $\text{D}(\Omega)$ es transitiva.
- c) $\text{D}(\Omega) = \text{HD}(\Omega)$.
- d) $V = \text{HD}(\Omega)$.
- e) $V = \text{D}(\Omega)$.

Y lo mismo vale si cambiamos Ω por Ω^ω .

DEMOSTRACIÓN: Se cumple que a) \Rightarrow e), pues $V_\alpha, V_\alpha \cap \text{D}(\Omega) \in \text{D}(\Omega)$ y ambos conjuntos tienen los mismos elementos en $\text{D}(\Omega)$. Por lo tanto, si $\text{D}(\Omega)$ cumple el axioma de extensionalidad, entonces $V_\alpha = V_\alpha \cap \text{D}(\Omega) \subset \text{D}(\Omega)$ para todo α , luego $V = \text{D}(\Omega)$.

La equivalencia d) \Leftrightarrow e) es inmediata, como también lo son las implicaciones e) \Rightarrow c) \Rightarrow b) \Rightarrow a). ■

Con este ajuste, no hay dificultad en probar que tenemos modelos de ZF:

Teorema 6.11 $\text{HD}(\Omega)$ y $\text{HD}(\Omega^\omega)$ son modelos transitivos de ZF.

DEMOSTRACIÓN: La prueba es idéntica para ambas clases. La veremos únicamente para Ω . La clase $\text{HD}(\Omega)$ cumple el axioma de extensionalidad porque es transitiva, y cumple el axioma de regularidad porque todas las clases lo cumplen.

El axioma del par se cumple porque si $u, v \in \text{HD}(\Omega)$, entonces tenemos que $\{u, v\} \in \text{D}(\Omega)$ por 6.7, luego $\{u, v\} \in \text{HD}(\Omega)$ por 6.9. El mismo razonamiento se aplica al axioma de la unión y al axioma de partes. El axioma de infinitud se cumple porque $\omega \in \text{HD}(\Omega)$. Falta probar el axioma del reemplazo. Para ello fijamos una fórmula $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n)$ y conjuntos $x_1, \dots, x_n, a \in \text{HD}(\Omega)$ y suponemos que

$$\bigwedge xyz \in \text{HD}(\Omega) (\phi^{\text{HD}(\Omega)}(x, y) \wedge \phi^{\text{HD}(\Omega)}(x, z) \rightarrow y = z).$$

Sea $b = \{y \in \text{HD}(\Omega) \mid \forall x \in a \phi^{\text{HD}(\Omega)}(x, y)\}$, que es un conjunto por el axioma del reemplazo. Se cumple que $b \in \text{D}(\Omega)$, pues

$$\bigwedge x(x = b \leftrightarrow \bigwedge v(v \in x \leftrightarrow v \in \text{HD}(\Omega) \wedge \forall u \in a \phi^{\text{HD}(\Omega)}(u, v))).$$

Esto prueba el axioma del reemplazo en $\text{HD}(\Omega)$. ■

Teorema 6.12 $\text{HD}(\Omega)$ es un modelo transitivo de ZFC.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar que todo conjunto $A \in \text{HD}(\Omega)$ puede ser bien ordenado^{HD(Ω)}. Puesto que “ser un buen orden” es absoluto para modelos transitivos de ZF, basta probar que existe un buen orden R sobre A tal que $R \in \text{HD}(\Omega)$. Para ello basta definir

$$R = \{(x, y) \in A \times A \mid x \leq y\},$$

donde $x \leq y$ es la fórmula definida en la prueba del teorema 6.6. Así R es un buen orden en A , y es fácil ver que si A es definible a partir de un ordinal γ , lo mismo le sucede a R , luego $R \in \text{D}(\Omega)$ y como $R \subset \text{HD}(\Omega)$, concluimos que $R \in \text{HD}(\Omega)$. ■

Puesto que el teorema anterior se demuestra en ZF, tenemos así una prueba alternativa de la consistencia de AE basada en la clase $\text{HD}(\Omega)$ en lugar de en L . El argumento no es adaptable a $\text{HD}(\Omega^\omega)$, pues no podemos definir explícitamente un buen orden en Ω^ω . Sin embargo, sí que podemos demostrar que $\text{HD}(\Omega^\omega)$ satisface el principio de elecciones dependientes ED (véase [TC, sección 3.3]), para lo cual nos basamos en lo siguiente:

Teorema 6.13 (ED) $\text{HD}(\Omega^\omega)^\omega \subset \text{HD}(\Omega^\omega)$.

DEMOSTRACIÓN: Sea $f : \omega \longrightarrow \text{HD}(\Omega^\omega)$. Por transitividad, $f \subset \text{HD}(\Omega^\omega)$, luego sólo hemos de probar que $f \in \text{D}(\Omega^\omega)$. Para cada $n \in \omega$ existe² $s_n \in \Omega^\omega$ tal que $f(n) = E_{\Omega^\omega}(s_n)$.

Fijemos una biyección definible $\langle , \rangle : \omega \times \omega \longrightarrow \omega$, por ejemplo la semejanza determinada por el orden canónico en $\omega \times \omega$. Sea $s \in \Omega^\omega$ la aplicación dada por $s(\langle n, m \rangle) = s_n(m)$. De este modo:

$$\bigwedge x(x = f \leftrightarrow x : \omega \longrightarrow \text{HD}(\Omega^\omega) \wedge$$

$$\bigwedge n \in \omega \bigvee t \in \Omega^\omega (\bigwedge m \in \omega t(m) = s(\langle n, m \rangle) \wedge x(n) = E_{\Omega^\omega}(t))),$$

y esta equivalencia demuestra que $f \in \text{D}(\Omega^\omega)$. ■

Teorema 6.14 (ED) $\text{HD}(\Omega^\omega)$ es un modelo transitivo de ZF + ED.

DEMOSTRACIÓN: Sean $A, R \in \text{HD}(\Omega^\omega)$ en las hipótesis de ED, es decir, $R \subset A \times A$ y $\bigwedge x \in A \bigvee y \in A R x$. Por ED existe $f : \omega \longrightarrow A$ tal que $\bigwedge n \in \omega f(n+1) R f(n)$ y por el teorema anterior $f \in \text{HD}(\Omega^\omega)$. Así pues, $\text{HD}(\Omega^\omega)$ cumple ED. ■

²Aquí usamos ED, pues estamos realizando una elección numerable.

Como ya hemos observado, el teorema 6.12 nos proporciona una prueba alternativa de la consistencia de AE distinta de la que obtenemos al considerar la clase L , pero no hemos demostrado la consistencia de $V = \text{HD}(\Omega)$. Una prueba elemental de este hecho consiste en observar que tenemos las inclusiones

$$L \subset \text{HD}(\Omega) \subset D(\Omega) \subset V, \quad L \subset \text{HD}(\Omega^\omega) \subset D(\Omega^\omega) \subset V.$$

Y si $V = L$ todas ellas son igualdades, luego es consistente que ése sea el caso, es decir, es consistente que todo conjunto sea hereditariamente definible por ordinales (y en particular por sucesiones de ordinales).

Podría pensarse que podríamos dar una prueba directa de este hecho (que no involucrara a L) demostrando que la clase $\text{HD}(\Omega)$ es un modelo de $V = \text{HD}(\Omega)$, pero sucede que esto no es necesariamente cierto. Equivalentemente, la fórmula “ $x \in \text{HD}(\Omega)$ ” no es necesariamente absoluta para $\text{HD}(\Omega)$. Para probarlo nos apoyamos en el teorema siguiente:

Teorema 6.15 (AE) *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. casi homogéneo M y G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces se cumple que $\text{HD}(\Omega)^{M[G]} \subset M$ y si \mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado M también $\text{HD}(\Omega^\omega)^{M[G]} \subset M$.*

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que existe un $x \in \text{HD}(\Omega)^{M[G]} \setminus M$. Podemos tomarlo de rango mínimo δ , con lo que $x \subset \text{HD}(\Omega)^{M[G]}$. Sea $\alpha \in \Omega^M$ tal que $(\bigwedge u(u = x \leftrightarrow \Phi_\Omega(\alpha, u)))^{M[G]}$. Así, $\bigwedge y \in M(y \in x \leftrightarrow \Psi^{M[G]}(\alpha, y))$, donde $\Psi(\alpha, y) \equiv \bigvee u(y \in u \wedge \Phi_\Omega(\alpha, u))$. De este modo, si $y \in x$, tenemos que $\Psi^{M[G]}(\alpha, y)$, luego existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash \Psi(\check{\alpha}, \check{y})$, y por 4.56 tenemos que, de hecho, $\mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash \Psi(\check{\alpha}, \check{y})$. El recíproco es trivial, luego

$$x = \{y \in V_{\delta+1} \mid \mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash \Psi(\check{\alpha}, \check{y})\}^M \in M,$$

contradicción.

Si consideramos $\text{HD}(\Omega^\omega)$ la situación es la misma salvo que ahora tenemos una sucesión $s \in (\Omega^\omega)^{M[G]}$ en lugar de un $\alpha \in \Omega^M$, pero si \mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado M entonces $s \in M$ y el argumento se aplica igualmente. ■

Así, por ejemplo, si aplicamos el teorema anterior a $\mathbb{P} = \text{Fn}(\aleph_0, 2, \aleph_0)$ y a un modelo de ZFC + $V = L$ obtenemos una extensión genérica en la que $V = L[a]$, para un cierto $a \subset \omega$ y $\text{HD}(\Omega) = L$.

Más concretamente, la prueba del teorema anterior muestra que $a \notin D(\Omega)$, con lo que, aunque claramente $\mathcal{P}\omega \in D(\Omega)$, es consistente que haya elementos de $\mathcal{P}\omega$ que no sean definibles por ordinales.

Usando $\mathbb{P} = \text{Fn}(\aleph_1, 2, \aleph_1)^M$ obtenemos el resultado análogo para $\text{HD}(\Omega^\omega)$ (aunque ahora $a \subset \omega_1$, ya que $\mathcal{P}\omega \in \text{HD}(\Omega^\omega)$).

Más significativo es que, como anunciábamos, $\text{HD}(\Omega)$ no cumple necesariamente $V = \text{HD}(\Omega)$:

Teorema 6.16 *Si ZFC es consistente, también lo es*

$$\text{ZFC} + L \subsetneq \text{HD}(\Omega) \subsetneq V + \text{HD}(\Omega)^{\text{HD}(\Omega)} = L.$$

DEMOSTRACIÓN: Razonamos en ZFC. Partimos de un modelo transitivo numerable M de $ZFC + V = L$ y tomamos $\mathbb{Q} = \text{Fn}(\aleph_0, 2, \aleph_0) \in M$ y un filtro \mathbb{Q} -genérico H sobre M . De este modo, si llamamos $a = \bigcup G$ a la función genérica determinada por H , tenemos un modelo $N = M[H] = M[a]$ que, según el teorema anterior, cumple que $\text{HD}(\Omega)^N \subset M$ y, como $M = L^N$, de hecho, $(\text{HD}(\Omega) = L)^N$. Por otra parte, $(V = L[a])^N$. Además, como M cumple la HCG, lo mismo le sucede a N .

Sea ahora $A = \{\aleph_n^N \mid n \in \omega\} \in N$ y definamos

$$E(\aleph_n) = \begin{cases} \aleph_{n+1} & \text{si } a(n) = 1, \\ \aleph_{n+2} & \text{si } a(n) = 0. \end{cases}$$

Tomamos $\mathbb{P} = (\prod_{n \in \omega} \text{Fn}(E(\aleph_n), 2, \aleph_n))^N$ y un filtro G \mathbb{P} -genérico sobre N . Entonces, según 5.35 la extensión $N[G]$ tiene los mismos cardinales que N y, según 5.37,

$$\bigwedge n \in \omega (2^{\aleph_n})^{N[G]} = E(\aleph_n).$$

Esto hace que $a \in D(\Omega)^{N[G]}$, pues

$$(\bigwedge x(x = a \leftrightarrow x \in \mathcal{C} \wedge \bigwedge n \in \omega (a(n) = 1 \leftrightarrow 2^{\aleph_n} = \aleph_{n+1})))^{N[G]}.$$

Claramente entonces $a \in \text{HD}(\Omega)^{N[G]}$, luego $(N = L[a] \subset \text{HD}(\Omega))^{N[G]}$. Por otra parte, es inmediato comprobar que un producto de c.p.o.s casi homogéneos es casi homogéneo, luego el teorema anterior nos da la inclusión opuesta. Así pues, $(\text{HD}(\Omega) = L[a] \subset V)^{N[G]}$, mientras que, según habíamos visto,

$$(\text{HD}(\Omega)^{\text{HD}(\Omega)})^{N[G]} = \text{HD}(\Omega)^N = M = L^{N[G]}.$$

Notas Una variante del teorema anterior consiste en suponer que M tiene un (mínimo) cardinal inaccesible κ y tomar como conjunto A el formado por los cardinales $\aleph_{\kappa+n}^M$ en lugar de \aleph_n . De este modo obtenemos un modelo en el que existe un $a \in {}^\omega 2$ (o, equivalentemente, un $x \subset \omega$) que cumple $a \in \text{HD}(\Omega)$, pero $a \notin \text{HD}(\Omega)^{V_\kappa}$, ya que $V_\kappa^{N[G]} = V_\kappa^N$ y si a fuera hereditariamente definible por ordinales en V_κ^N también lo sería en N .

Así pues, vemos que “ser hereditariamente definible por ordinales” no es absoluto ni siquiera para los modelos V_κ , para los que “prácticamente todo” es absoluto. Hay que tener en cuenta todo V para determinar si un simple subconjunto de ω es o no definible por ordinales.

Otra variante es en tomar $\mathbb{Q} = \text{Fn}(\omega_2 \times \omega, 2, \aleph_0)$, con lo que $(2^{\aleph_0} = \aleph_2)^N$ (y tomar como a una cualquiera de las \aleph_2 funciones genéricas que hay en N). Así vemos que es consistente que $(2^{\aleph_0} = \aleph_2)^{\text{HD}(\Omega)}$, por lo que, al contrario que L , la clase $\text{HD}(\Omega)$ no puede usarse para probar la consistencia de la hipótesis del continuo.

Por último, todo el argumento se adapta al caso de $\text{HD}(\Omega^\omega)$ sin más que excluir el factor correspondiente a $n = 0$ en la definición de \mathbb{P} , para que éste sea \aleph_1 -cerrado. ■

Vemos así que el hecho de que el modelo $\text{HD}(\Omega)$ cumpla una determinada propiedad (por ejemplo, $2^{\aleph_0} = \aleph_2$) no implica necesariamente que dicha propiedad sea consistente con $V = \text{HD}(\Omega)$. Por ejemplo, el teorema 6.12 no sirve como prueba de que $V = \text{HD}(\Omega) \rightarrow \text{AE}$.

Por consiguiente, hasta ahora el único argumento que hemos dado que prueba la consistencia de $V = \text{HD}(\Omega)$ es que se cumple trivialmente si $V = L$. Veamos a continuación que también es consistente con $V \neq L$:

Teorema 6.17 *Si ZFC es consistente, también lo es ZFC + $L \subsetneq \text{HD}(\Omega) = V$.*

DEMOSTRACIÓN: Razonamos en ZFC. Partimos de un modelo transitivo numerable M de ZFC + $V = L$ y consideramos un cardinal $^M\kappa$ tal que $\kappa = \omega_\kappa^M$. Consideramos

$$\mathbb{P} = (\prod_{\alpha < \kappa} \text{Fn}(\omega_{2\alpha+3} \setminus \omega_{2\alpha+1}, 2, \aleph_{2\alpha+1}))^M,$$

tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico G y formamos la extensión genérica $M[G]$. Notemos que \mathbb{P} es semejante al producto de Easton (5.31) correspondiente (en M) a la función E de dominio $A = \{\aleph_{2\alpha+1} \mid \alpha < \kappa\}$ dada por $E(\mu) = \mu^{++}$. Por lo tanto, sabemos que $M[G]$ tiene los mismos cardinales y cofinalidades que M y que la función del continuo en $M[G]$ (bajo κ) viene dada por

$$2^{\aleph_{2\alpha+1}} = \aleph_{2\alpha+3}, \quad 2^{\aleph_{2\alpha}} = \aleph_{2\alpha+1}.$$

Sea $\mathbb{P}_\alpha = \text{Fn}(\omega_{2\alpha+3} \setminus \omega_{2\alpha+1}, 2, \aleph_{2\alpha+1})^M$, sea $i_\alpha : \mathbb{P}_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}$ la inmersión completa, $G_\alpha = i_\alpha^{-1}[G]$ y $f_\alpha = \bigcup G_\alpha$. Así $f_\alpha : \omega_{2\alpha+3} \setminus \omega_{2\alpha+1} \longrightarrow 2$.

Notemos que $\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa} \in M[G]$. Ahora definimos en $M[G]$ una sucesión creciente $\{B_\alpha\}_{\alpha \leq \kappa}$ de conjuntos $B_\alpha \subset \omega_{2\alpha+3}$ mediante

$$B_\alpha = \begin{cases} \bigcup_{\delta < \alpha} B_\delta & \text{si } \alpha \notin \{0\} \cup \bigcup_{\delta < \alpha} B_\delta, \\ \{0\} \cup \bigcup_{\delta < \alpha} B_\delta \cup \{\delta \in \omega_{2\alpha+3} \setminus \omega_{2\alpha+1} \mid f_\alpha(\delta) = 1\} & \text{si } \alpha \in \{0\} \cup \bigcup_{\delta < \alpha} B_\delta. \end{cases}$$

De este modo,

$$B_0 = \{0\} \cup \{\delta \in \omega_3 \setminus \omega_1 \mid f_0(\delta) = 1\}$$

determina a f_0 . Los siguientes B_α son todos iguales a E_0 hasta el mínimo $\alpha < \omega_3$ tal que $f_0(\alpha) = 1$, para el cual tenemos que

$$B_\alpha = B_0 \cup \{\delta \in \omega_{2\alpha+3} \setminus \omega_{2\alpha+1} \mid f_\alpha(\delta) = 1\},$$

y así B_α codifica a f_0 y f_α , etc. Llamamos $B = B_\kappa = \bigcup_{\alpha < \kappa} B_\alpha$.

Notemos que, en general, $\bigcup_{\delta < \alpha} B_\delta \subset \omega_{2\alpha+1}$ y $\alpha \leq \omega_\alpha < \omega_{2\alpha+1}$, por lo que si $\alpha < \kappa$ pertenece o no a B se determina antes de definir B_α .

Ahora consideramos el modelo $N = M[B] \subset M[G]$ dado por el teorema 4.65. El hecho de que los cardinales y la cofinalidades en M se conserven en $M[G]$

implica que también se conservan en N , de modo que los tres modelos tienen los mismos cardinales y cofinalidades. Observemos que si $\alpha \in B$, entonces

$$f_\alpha(\delta) = 1 \leftrightarrow \delta \in B \cap (\omega_{2\alpha+3}^N \setminus \omega_{2\alpha+1}^N),$$

por lo que $\{f_\alpha\}_{\alpha \in B} \in N$. En particular, ahora es claro que $N \neq M$, luego $(V \neq L)^N$. Basta probar que $B \in \text{HD}(\Omega)^N$, pues la minimalidad de $M[B]$ implica entonces que $N = M[B] \subset \text{HD}(\Omega)^N \subset N$, y en definitiva concluimos que $(L \not\subset \text{HD}(\Omega) = V)^N$.

A su vez, basta probar que

$$\bigwedge \alpha < \kappa (\alpha \in B \leftrightarrow 2^{\aleph_{2\alpha+1}} = \aleph_{2\alpha+3})^N,$$

pues esto, junto con el hecho de que $B \subset \kappa$, nos da una definición de B en N a partir del ordinal κ .

Si $\alpha \in B$, entonces $f_\alpha \in N$, luego $G_\alpha \in N$, pero G_α es un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M , donde $\mathbb{P}_\alpha = \text{Fn}(\omega_{2\alpha+3}, 2, \aleph_{2\alpha+1})^M$ y $M[G_\alpha] \subset N$. Sabemos que en $M[G_\alpha]$ se cumple $2^{\aleph_{2\alpha+1}} = \aleph_{2\alpha+3}$, luego en N hay al menos $\aleph_{2\alpha+3}$ subconjuntos de $\omega_{2\alpha+1}$ y, como en $M[G]$ no hay más, ése tiene que ser el número exacto.

Supongamos ahora que $\alpha \in \kappa \setminus B$ y sea

$$\mathbb{P}^* = \left(\prod_{\alpha \neq \alpha_0} \text{Fn}(\omega_{2\alpha+3} \setminus \omega_{2\alpha+1}, 2, \aleph_{2\alpha+1}) \right)^M,$$

de modo que en M tenemos la descomposición $\mathbb{P} \cong \mathbb{P}^* \times \mathbb{P}_\alpha$, que a su vez se traduce en que $M[G] = M[G^*][G_\alpha]$ donde G^* es \mathbb{P}^* -genérico sobre M . Tenemos entonces que $\{f_\delta\}_{\delta \neq \alpha} \in M[G^*]$ y es claro que $B \in M[G^*]$, porque f_α no interviene realmente en la definición de B , en el sentido de que si aplicamos la misma definición en $M[G^*]$ tomando cualquier $f_\alpha \in M[G^*]$ en lugar de “la auténtica”, el conjunto definido es el mismo, pues al llegar a la definición de B_α se tiene que $\alpha \notin \bigcup_{\delta < \alpha} B_\delta$ y f_α no se emplea en la definición.

Por lo tanto, $N = M[B] \subset M[G^*]$, pero $M[G^*]$ es una extensión mediante un producto de Easton (con los mismos cardinales que M , luego que N) que cumple $2^{\aleph_{2\alpha+1}} = \aleph_{2\alpha+2}$, por lo que en N tiene que cumplirse esto mismo. ■

Ahora sí que podemos afirmar que $V = \text{HD}(\Omega)$ no implica la hipótesis del continuo. Recordemos que, trivialmente, el axioma $V = \text{HD}(\Omega)$ es equivalente a $V = \text{D}(\Omega)$. Notemos además que si se cumple $V = \text{HD}(\Omega)$, al igual que si $V = L$, tenemos que la clase de todos los conjuntos admite un buen orden definible mediante una fórmula (metamatemática) explícita.

Podríamos demostrar que es consistente que $\text{HD}(\Omega^\omega)$ no cumpla el axioma de elección, con lo que tendríamos demostrado que AE no puede probarse en ZFC. Sin embargo, en la sección siguiente lo demostraremos tomando como modelo una clase algo menor.

6.2 Constructibilidad relativa

Consideramos la modificación siguiente de la definición de la clase de los conjuntos constructibles:

Definición 6.18 Dado un conjunto A , definimos la clase $L(A)$ de los conjuntos constructibles sobre A mediante la siguiente recursión transfinita (que podemos definir incluso en ZF–AP):

$$\begin{aligned} L_0(A) &= \text{ct } A \cup \{A\}, \quad \wedge \alpha \ L_{\alpha+1}(A) = \mathcal{PDL}_\alpha(A), \quad \wedge \lambda \ L_\lambda(A) = \bigcup_{\delta < \lambda} L_\delta(A), \\ L(A) &= \bigcup_{\alpha \in \Omega} L_\alpha(A). \end{aligned}$$

Como vemos, la variante consiste en que en lugar de tomar $L_0 = \emptyset$ tomamos como primer nivel de la jerarquía un conjunto transitivo arbitrario A , junto con su clausura transitiva, para que la clase $L(A)$ acabe siendo transitiva.

Es importante no confundir la clase $L(A)$ que acabamos de definir con la clase $L[A]$ definida en 3.5. Por ejemplo, hemos visto que no se cumple necesariamente $A \in L[A]$, mientras que trivialmente $A \in L_0(A) \subset L(A)$. Más concretamente, en $L[A]$ el conjunto A se utiliza como una mera referencia para definir conjuntos, mientras que en $L(A)$ el conjunto A y los elementos de su clausura transitiva se admiten como constructibles “sin hacer preguntas”. Los teoremas básicos sobre la constructibilidad relativa se demuestran exactamente igual que los correspondientes a la constructibilidad absoluta, así que no repetiremos las pruebas. Por ejemplo, el teorema siguiente se prueba (en ZF–AP) exactamente igual que 3.6:

Teorema 6.19 *Sea A un conjunto. Entonces:*

- a) *Cada $L_\alpha(A)$ es un conjunto transitivo.*
- b) *$L(A)$ es una clase transitiva.*
- c) *Si $\alpha \leq \beta$ entonces $L_\alpha(A) \subset L_\beta(A)$.*
- d) *$\mathcal{P}^f L_\alpha(A) \subset L_{\alpha+1}(A) \subset \mathcal{P}L_\alpha(A)$.*
- e) *$L_\alpha(A) \in L_{\alpha+1}(A)$.*
- f) *$L_\alpha \subset L_\alpha(A)$.*
- g) *$L \subset L(A)$.*
- h) *$A \in L(A)$.*

No es cierto en general que $L_\alpha(A) \cap \Omega = \alpha$, pues si A contiene ordinales éstos aparecerán “antes de tiempo” en la jerarquía (están desde el principio), pero en cualquier caso $\Omega \subset L \subset L(A)$.

El teorema siguiente se prueba exactamente igual que 3.8:

Teorema 6.20 *Si A es un conjunto, la clase $L(A)$ es un modelo transitivo de ZF–AP, o de todo ZF si suponemos AP.*

La prueba del teorema 3.7 se adapta trivialmente para probar que el término $L_\alpha(A)$ es Δ_1 y, por consiguiente, absoluto para modelos transitivos de ZF–AP. Sin embargo, para lo que vamos a necesitar es suficiente constatar que, dado que ct X y $\mathcal{P}^D X$ son absolutos, la definición recurrente de $L_\alpha(A)$ es absoluta (al relativizarla a un modelo, no hay nada que relativizar realmente). Como consecuencia tenemos (con la misma prueba) la versión siguiente de 3.9:

Teorema 6.21 *Sea A un conjunto y M un modelo transitivo de ZF–AP tal que $A \in M$. Entonces*

a) *Si M es una clase propia entonces $L(A) \subset M$ y*

$$\bigwedge x \in M (x \in L(A)^M \leftrightarrow x \in L(A)).$$

b) *Si M es un conjunto y $\lambda = \Omega^M$, entonces $L_\lambda(A) \subset M$ y*

$$\bigwedge x \in M (x \in L(A)^M \leftrightarrow x \in L_\lambda(A)).$$

En particular, $(V = L(A))^{L(A)}$. Además $L(A)$ es la menor clase propia que contiene a A y es un modelo de ZF–AP. Comparando con 3.11 concluimos que si $A \in L[A]$ entonces $L[A] = L(A)$ y, en general, $L[A] = L(A \cap L[A])$. Por lo tanto, los modelos $L[A]$ son un caso particular de los modelos $L(A)$.

Supongamos ahora el axioma de partes y observemos que

$$(V = L(\mathcal{P}\omega))^{L(\mathcal{P}\omega)},$$

si bien esto no es consecuencia inmediata de la observación precedente. En efecto, si llamamos $\phi(A) \equiv V = L(A)$ y $A = \mathcal{P}\omega$, lo que sabemos es que $(V = L(A))^{L(\mathcal{P}\omega)}$, es decir, $\phi^{L(\mathcal{P}\omega)}(\mathcal{P}\omega)$, mientras que lo que queremos probar es

$$\phi(\mathcal{P}\omega)^{L(\mathcal{P}\omega)} \equiv \phi^{L(\mathcal{P}\omega)}((\mathcal{P}\omega)^{L(\mathcal{P}\omega)}).$$

Por consiguiente, nos falta demostrar que $\mathcal{P}\omega = (\mathcal{P}\omega)^{L(\mathcal{P}\omega)}$. Ahora bien, esto es fácil:

$$(\mathcal{P}\omega)^{L(\mathcal{P}\omega)} = \mathcal{P}\omega \cap L(\mathcal{P}\omega) = \mathcal{P}\omega.$$

Con esto hemos probado:

Teorema 6.22 [ZF] *$L(\mathcal{P}\omega)$ es un modelo transitivo de ZF+V = $L(\mathcal{P}\omega)$.*

En general no puede probarse que $L(A)$ cumpla el axioma de elección ni siquiera suponiendo este axioma. Esto lo demostraremos en 6.29, pero ahora vamos a entender cuál es el problema.

Teorema 6.23 *Si A es un conjunto, entonces la clase $L(A)$ cumple el axioma de elección si y sólo si ct A tiene un buen \leq tal que $\leq \in L(A)$.*

DEMOSTRACIÓN: Puesto que $L(A)$ es un modelo de $ZF-AP+V = L(A)$, podemos trabajar en esta teoría y demostrar que el axioma de elección equivale a que $\text{ct } A$ pueda ser bien ordenada. Con más detalle, si suponiendo $V = L(A)$ demostramos que

$$AE \leftrightarrow \bigvee R \quad R \text{ es un buen orden en } \text{ct } A,$$

en $ZF-AP$ podremos demostrar la relativización de este teorema a $L(A)$, es decir,

$$AE^{L(A)} \leftrightarrow \bigvee R \in L(A) \quad R \text{ es un buen orden en } \text{ct } A,$$

donde hemos usado que “ser un buen orden” y $\text{ct } A$ son absolutos.

Una implicación es obvia. Supongamos ahora que $\text{ct } A$ admite un buen orden \leq (que podemos extender obviamente a $\text{ct } A \cup \{A\}$), y veamos que todo conjunto puede ser bien ordenado. Para ello basta definir

$$\begin{aligned} \trianglelefteq_0 &= \leq \wedge \bigwedge \alpha \quad \trianglelefteq_{\alpha+1} = (\trianglelefteq_\alpha)_{L_\alpha(A)} \wedge \bigwedge \lambda \quad \trianglelefteq_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} \trianglelefteq_\delta . \\ \trianglelefteq &= \bigcup_{\alpha \in \Omega} \trianglelefteq_\alpha , \end{aligned}$$

donde $(\trianglelefteq_\alpha)_{L_\alpha(A)} = (\trianglelefteq_\alpha)_{L_\alpha(A), \emptyset}$ es el buen orden dado por 3.4. Una simple inducción transfinita muestra que \trianglelefteq es un buen orden sobre V , que a su vez se restringe a un buen orden sobre cada conjunto. ■

Vemos, pues, que si suponemos el axioma de elección, lo máximo que podemos probar es que $\text{ct } A$ puede ser bien ordenada, pero eso no garantiza que $L(A)$ cumpla el axioma de elección, pues para ello hace falta que algún buen orden de $\text{ct } A$ esté en $L(A)$ (si no, alguien que “viva” en $L(A)$ se creerá que A no puede ser bien ordenado, porque él no verá ninguno de sus buenos órdenes, por más que éstos existan fuera de $L(A)$).

Ejercicio: Probar que en $L(\mathcal{P}\omega)$ todo conjunto puede ser totalmente ordenado.

AYUDA: Partir de un orden total en $\mathcal{P}\omega$ obtenido a partir de [TC 4.75] o, alternativamente, a partir de una inyección de $\mathcal{P}\omega$ en \mathbb{R} .

Hay un caso de especial interés en el que podemos garantizar que $L(A)$ cumple el axioma de elección, y es cuando A es un conjunto de ordinales:

Teorema 6.24 *Si A es un conjunto de ordinales entonces $L(A)$ es un modelo transitivo de ZFC-AP (o de todo ZFC si suponemos AP).*

DEMOSTRACIÓN: Razonamos en $ZF-AP+V = L(A)$ y observamos que si $A \subset \Omega$ entonces $\text{ct } A \subset \Omega$, y el buen orden de Ω se restringe a un buen orden en $\text{ct } A$. ■

Una prueba alternativa del teorema anterior es observar que si $A \subset \Omega$ entonces $A \in L[A]$, luego $L(A) = L[A]$.

Ahora vamos a probar (en $ZF + ED$) que $L(\mathcal{P}\omega)$ cumple el principio de elecciones dependientes ED. Necesitamos el siguiente resultado auxiliar:

Teorema 6.25 (ZF + $V = L(\mathcal{P}\omega)$) Para cada ordinal α existe un ordinal λ_α y una aplicación $\pi_\alpha : \lambda_\alpha \times \mathcal{P}\omega \rightarrow L_\alpha(\mathcal{P}\omega)$ suprayectiva.

DEMOSTRACIÓN: Como no podemos usar ninguna forma de axioma de elección, se trata de construir explícitamente la función π_α , sin que la construcción dependa de ninguna elección arbitraria que no podamos precisar. Para ello observemos en primer lugar que podemos definir una biyección explícita $\omega \times \omega \rightarrow \omega$. Por ejemplo, basta tomar la semejanza entre $\omega \times \omega$ con el orden canónico [TC 2.30] y su ordinal, que claramente es ω .

A partir de esta biyección podemos construir claramente a su vez una biyección $(\omega^2)^\omega \rightarrow \omega^2$, y a partir de la biyección obvia $\mathcal{P}\omega \rightarrow \omega^2$, obtenemos una biyección $\mathcal{P}\omega \rightarrow (\mathcal{P}\omega)^\omega$.

Construiremos las aplicaciones π_α por recurrencia sobre α , de modo que, aunque existan infinitas aplicaciones que cumplan el teorema, π_α será la única aplicación tal que existe una sucesión de aplicaciones $\{\pi_\delta\}_{\delta \leq \alpha}$ en la que π_0 se define concretamente como veremos, y en la que $\pi_{\delta+1}$ se obtiene a partir de π_δ de la forma concreta en que veremos y en la que, para cada límite λ , π_λ se obtiene a partir de $\{\pi_\delta\}_{\delta < \lambda}$ de la forma concreta que veremos.

Tenemos que $L_0(\mathcal{P}\omega) = \text{ct } \mathcal{P}\omega \cup \{\mathcal{P}\omega\} = \mathcal{P}\omega \cup \{\mathcal{P}\omega\}$. Por lo tanto, podemos definir $\pi_0 : 2 \times \mathcal{P}\omega \rightarrow L_0(\mathcal{P}\omega)$ mediante

$$\pi(i, x) = \begin{cases} x & \text{si } i = 0, \\ \mathcal{P}\omega & \text{si } i = 1, \end{cases}$$

y claramente π_0 es suprayectiva. Supongamos definida π_α y consideremos $L_{\alpha+1}(\mathcal{P}\omega) = \mathcal{PDL}_\alpha(\mathcal{P}\omega)$.

Podemos definir explícitamente $\omega \rightarrow \omega^{<\omega}$ biyectiva.³ A partir de ella podemos construir fácilmente, para cada $n \in \omega$ y cada conjunto X , una aplicación

$$\omega \rightarrow \text{Form}^{n+1}(\mathcal{L}_{\text{tc}}) \rightarrow \text{Df}(X, n+1) \text{ suprayectiva.}$$

A su vez obtenemos, para cada conjunto X ,

$$\bigcup_{n \in \omega} X^n \times \omega \rightarrow \bigcup_{n \in \omega} (X^n \times \text{Df}(X, n+1)) \rightarrow \mathcal{PDX} \text{ suprayectiva.}$$

Usando ahora π_α obtenemos

$$\bigcup_{n \in \omega} (\lambda_\alpha^n \times (\mathcal{P}\omega)^n \times \omega) \rightarrow L_{\alpha+1}(\mathcal{P}\omega) \text{ suprayectiva.}$$

Si llamamos λ_n^* al ordinal de λ_α^n con el orden lexicográfico y λ^* al supremo de los λ_n^* , obtenemos aplicaciones suprayectivas $\lambda^* \rightarrow \lambda_\alpha^n$, y a partir de una biyección $\mathcal{P}\omega \rightarrow (\mathcal{P}\omega)^\omega$ obtenemos $\mathcal{P}\omega \rightarrow (\mathcal{P}\omega)^\omega$ suprayectiva, de donde a su vez obtenemos

$$\omega \times \lambda^* \times \mathcal{P}\omega \times \omega = \bigcup_{n \in \omega} (\lambda^* \times \mathcal{P}\omega \times \omega) \rightarrow L_{\alpha+1}(\mathcal{P}\omega) \text{ suprayectiva.}$$

³Por ejemplo, en la prueba de [TC 4.35] se ve cómo biectar $\omega^{<\omega} \setminus \{\emptyset\}$ con $\omega \times \omega$, y a partir de ahí es fácil construir la biyección pedida. Hay muchas otras construcciones alternativas.

Por último, llamando $\lambda_{\alpha+1}$ al ordinal de $\omega \times \lambda^* \times \omega$ con el orden lexicográfico llegamos a $\pi_{\alpha+1} : \lambda_{\alpha+1} \times \mathcal{P}\omega \longrightarrow L_{\alpha+1}(\mathcal{P}\omega)$ suprayectiva.

Ahora suponemos construidas $\{\pi_\alpha\}_{\alpha < \lambda}$ y definimos una aplicación suprayectiva

$$\pi' : \lambda \times \lambda' \times \mathcal{P}\omega \longrightarrow \bigcup_{\alpha < \lambda} L_\alpha(\mathcal{P}\omega) = L_\lambda(\mathcal{P}\omega),$$

donde λ' es el supremo de $\{\lambda_\alpha\}_{\alpha < \lambda}$. Concretamente,

$$\pi'(\alpha, \beta, x) = \begin{cases} \pi_\alpha(\beta, x) & \text{si } \beta < \lambda_\alpha, \\ \emptyset & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Una vez más consideramos una semejanza $\lambda_\lambda \longrightarrow \lambda \times \lambda'$ (respecto del buen orden lexicográfico) y al componer obtenemos π_λ . ■

Observemos que es posible dar un paso más en la prueba del teorema anterior para concluir lo siguiente:

Teorema 6.26 *Existe una fórmula (metamatemática) $\phi(\alpha, x, v)$, sin más variables libres que las indicadas, de modo que*

$$(\bigwedge u \bigvee \alpha \in \omega \bigvee x \in \mathcal{P}\omega \bigwedge v (v = u \leftrightarrow \phi(\alpha, x, v)))^{L(\mathcal{P}\omega)}.$$

En otras palabras, todo elemento de $L(\mathcal{P}\omega)$ es (explícitamente) definible a partir de un ordinal y de un elemento de $\mathcal{P}\omega$.

DEMOSTRACIÓN: La demostración del teorema anterior muestra que existe una fórmula $\psi(f, \alpha)$ con las variables libres indicadas de modo que

$$\bigwedge \alpha \in \Omega \bigwedge f (\psi(f, \alpha) \leftrightarrow f = \pi_\alpha)^{L(\mathcal{P}\omega)}.$$

La idea es que ψ es la fórmula que afirma que existe una función F cuyo dominio es $\alpha + 1$, de modo que $F(0)$ cumple la definición que hemos dado de π_0 , y para todo $\delta < \alpha$ se cumple que $F(\delta + 1)$ se define a partir de $F(\delta)$ como hemos indicado, para todo límite $\lambda \leq \alpha$ se cumple que $F(\lambda)$ se define a partir de $\{F(\delta)\}_{\delta < \lambda}$ como hemos indicado y $f = F(\alpha)$.

Consideramos el buen orden canónico en $\Omega \times \Omega$, que determina una semejanza $\langle , \rangle : \Omega \times \Omega \longrightarrow \Omega$. Definimos $\phi(\alpha, x, v)$ como la fórmula:

$$\begin{aligned} \alpha \in \Omega \wedge x \in \mathcal{P}\omega \wedge \bigvee \pi \bigvee \beta \gamma \in \Omega (\alpha = \langle \beta, \gamma \rangle \wedge \psi(\pi, \beta) \wedge \\ ((\langle \gamma, x \rangle \in \mathcal{D}\pi \wedge v = \pi(\gamma, x)) \vee (\langle \gamma, x \rangle \notin \mathcal{D}\pi \wedge v = \emptyset))). \end{aligned}$$

■

Ahora estamos en condiciones de probar el resultado que anunciábamos:

Teorema 6.27 (ED) *$L(\mathcal{P}\omega)$ cumple ED.*

DEMOSTRACIÓN: El teorema 6.25 relativizado a $L(\mathcal{P}\omega)$ implica que, para cada ordinal α , existe un ordinal λ_α y una aplicación $\pi_\alpha \in L(\mathcal{P}\omega)$ de manera que $\pi_\alpha : \lambda_\alpha \times \mathcal{P}\omega \longrightarrow L_\alpha(\mathcal{P}\omega)$ suprayectiva.

Tomemos ahora $A, R \in L(\mathcal{P}\omega)$ que cumplan las hipótesis de ED. Consideramos un ordinal α tal que $A, R \in L_\alpha(\mathcal{P}\omega)$. Utilizando ED (en V), podemos afirmar que existe $f_0 : \omega \longrightarrow A$ tal que $\bigwedge n \in \omega f_0(n+1) R f_0(n)$. Lo que no podemos asegurar en principio es que $f_0 \in L(\mathcal{P}\omega)$.

Como (en V) podemos hacer elecciones numerables, sabemos que existen sucesiones $\{\beta_n\}_{n \in \omega}$ y $\{x_n\}_{n \in \omega}$ de modo que $\bigwedge n \in \omega \pi_\alpha(\beta_n, x_n) = f_0(n)$.

No necesitamos AE para construir una biyección $g : \omega \times \omega \longrightarrow \omega$, luego podemos tomar $g \in L(\mathcal{P}\omega)$. Llamamos $x = \{g(i, n) \mid i \in x_n\}$. De este modo $x \in \mathcal{P}\omega \subset L(\mathcal{P}\omega)$, lo que a su vez implica que $\{x_n\}_{n \in \omega} \in L(\mathcal{P}\omega)$, pues la sucesión puede reconstruirse a partir de x .

Por el contrario, no podemos asegurar que $\{\beta_n\}_{n \in \omega} \in L(\mathcal{P}\omega)$, pero podemos razonar como sigue: consideramos en $\omega \times \alpha$ la relación

$$(n, \beta) R (n', \beta') \leftrightarrow n = n' + 1 \wedge R(\pi_\alpha(\beta', x_{n'}), \pi_\alpha(\beta, x_n)).$$

Claramente, $R \in L(\mathcal{P}\omega)$ y no está bien fundada en V , pues tenemos la sucesión

$$\dots R(\beta_3, x_3) R(\beta_2, x_2) R(\beta_1, x_1) R(\beta_0, x_0).$$

Entonces tampoco puede estar bien fundada en $L(\mathcal{P}\omega)$, porque “ser una relación bien fundada” es un concepto Δ_1 , luego absoluto para modelos transitivos de ZF. Por consiguiente, existe un conjunto $X \in L(\mathcal{P}\omega)$ tal que $X \subset \omega \times \lambda$ y no tiene elemento R -minimal. Finalmente, como $\omega \times \lambda$ puede ser bien ordenado en $L(\mathcal{P}\omega)$, podemos construir una función $h \in L(\mathcal{P}\omega)$ tal que $h : \omega \longrightarrow X$ y $\bigwedge n \in \omega h(n+1) R h(n)$. A su vez, si $h = \{(\beta_i, n_i)\}_{i \in \omega}$, podemos definir $f : \omega \longrightarrow A$ mediante $f(i) = \pi_\alpha(\beta_i, x_{n_i})$. Así $f \in L(\mathcal{P}\omega)$ y $\bigwedge i \in \omega f(i+1) R f(i)$. ■

Ahora vamos a probar que es consistente con ZFC que $L(\mathcal{P}\omega)$ no cumpla el axioma de elección. La prueba se basa en el siguiente resultado técnico:

Teorema 6.28 *Sea $\phi(x)$ una fórmula con x como única variable libre. Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y consideremos dos conjuntos no numerables ^{M} I, J . Sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(I, 2, \aleph_0)$ y $\mathbb{Q} = \text{Fn}(J, 2, \aleph_0)$. Entonces, para todo ordinal $\alpha \in M$ se cumple*

$$\mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)} \leftrightarrow \mathbb{1}_\mathbb{Q} \Vdash \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)}.$$

DEMOSTRACIÓN: Supongamos, por ejemplo, que $(|I| \leq |J|)^M$. Consideremos $\mathbb{R} = \text{Fn}(I, J, \aleph_1)^M$ y sea H un filtro \mathbb{R} -genérico sobre M . Entonces $(|I| = |J|)^{M[H]}$, pues la aplicación genérica $f_H : I \longrightarrow J$ es suprayectiva.

Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre $M[H]$ (luego \mathbb{P} -genérico sobre M). Veamos que $\mathcal{P}\omega \cap M[H][G] = \mathcal{P}\omega \cap M[G]$. Una inclusión es obvia. Para probar la

otra tomamos $x \in \mathcal{P}\omega \cap M[H][G]$. Por el teorema 5.21, existe un buen nombre $\sigma \in M[H]^\mathbb{P}$ para un subconjunto de $\check{\omega}$ tal que $x = \sigma_G$. Esto significa que

$$\sigma = \bigcup_{n \in \omega} \{\check{n}\} \times A_n,$$

donde A_n es una anticadena en \mathbb{P} . Ahora bien, \mathbb{P} cumple la condición de cadena numerable ^{$M[H]$} (teorema 5.15), luego cada $A_n \subset \mathbb{P} \subset M$ es numerable ^{$M[H]$} . Por consiguiente, también $\sigma \subset M$ es numerable ^{$M[H]$} . Como $(\mathbb{R} \text{ es } \aleph_1\text{-cerrado})^M$, el teorema 5.8 nos da que, de hecho, $\sigma \in M^\mathbb{P}$. Por consiguiente, $x = \sigma_G \in M[G]$.

Tenemos, pues, que $(\mathcal{P}\omega)^{M[G]} = (\mathcal{P}\omega)^{M[H][G]}$. Como el término $L_\alpha(A)$ es absoluto para modelos transitivos de ZF, concluimos que para todo ordinal $\alpha \in M$ se cumple $L_\alpha(\mathcal{P}\omega)^{M[G]} = L_\alpha(\mathcal{P}\omega)^{M[H][G]}$. A su vez esto implica que los conjuntos $x \in M[H][G]$ que cumplen $(x \in L(\mathcal{P}\omega))^{M[H][G]}$ son exactamente los conjuntos $x \in M[G]$ que cumplen $(x \in L(\mathcal{P}\omega))^{M[G]}$. Es claro entonces que si $\alpha \in M$, se cumple

$$(\phi(\alpha)^{L(\mathcal{P}\omega)})^{M[H][G]} \leftrightarrow (\phi(\alpha)^{L(\mathcal{P}\omega)})^{M[G]},$$

pues, al relativizar, las variables ligadas quedan restringidas por condiciones equivalentes. De aquí a su vez obtenemos que

$$\forall p \in \mathbb{P} \ p \Vdash_M \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)} \leftrightarrow \forall p \in \mathbb{P} \ p \Vdash_{M[H]} \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)}.$$

Ahora bien, por 5.14 tenemos que \mathbb{P} es casi homogéneo en M y en $M[H]$, luego el teorema 4.56 nos da que

$$\mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash_M \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)} \leftrightarrow \mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash_{M[H]} \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)}.$$

Todo el razonamiento vale para \mathbb{Q} igual que para \mathbb{P} , luego también tenemos

$$\mathbb{1}_\mathbb{Q} \Vdash_M \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)} \leftrightarrow \mathbb{1}_\mathbb{Q} \Vdash_{M[H]} \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)}.$$

Por último, como $(|I| = |J|)^{M[H]}$, tenemos que \mathbb{P} y \mathbb{Q} son semejantes en $M[H]$, con lo que el teorema 4.48 nos da que

$$\mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash_{M[H]} \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)} \leftrightarrow \mathbb{1}_\mathbb{Q} \Vdash_{M[H]} \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)}.$$

En definitiva,

$$\mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash_M \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)} \leftrightarrow \mathbb{1}_\mathbb{Q} \Vdash_M \phi(\check{\alpha})^{L(\mathcal{P}\omega)}. \quad \blacksquare$$

Ahora podemos probar que el axioma de elección no es demostrable en ZF:

Teorema 6.29 *Si ZFC es consistente, también lo es ZF + V = L($\mathcal{P}\omega$) + $\mathcal{P}\omega$ no puede ser bien ordenado.*

DEMOSTRACIÓN: Sea M un modelo transitivo numerable de $ZFC + V = L$. Sea $I \in M$ un conjunto no numerable M y consideremos el c.p.o. $\mathbb{P} = Fn(I, 2, \aleph_0)$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sea $N = L(\mathcal{P}\omega)^{M[G]}$. Por el teorema 6.22 sabemos que N es un modelo transitivo (numerable) de $ZF + V = L(\mathcal{P}\omega)$. Si suponemos que $(\mathcal{P}\omega$ puede ser bien ordenado) N , podemos considerar

$$\kappa = |\mathcal{P}\omega|^N = (|\mathcal{P}\omega|^{L(\mathcal{P}\omega)})^{M[G]},$$

es decir, el menor ordinal biyectable con $(\mathcal{P}\omega)^N$ mediante una biyección perteneciente a N . Como \mathbb{P} es casi homogéneo M , se cumple que

$$1_{\mathbb{P}} \Vdash (\check{\kappa} = |\mathcal{P}\omega|^{L(\mathcal{P}\omega)}).$$

Sea μ un cardinal regular M tal que $\mu > \kappa$ y sea $\mathbb{Q} = Fn(\mu, 2, \aleph_0)^M$. Por el teorema anterior también $1_{\mathbb{Q}} \Vdash (\check{\kappa} = |\mathcal{P}\omega|^{L(\mathcal{P}\omega)})$. Sea G' un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M . Así $\kappa = (|\mathcal{P}\omega|^{L(\mathcal{P}\omega)})^{M[G']}$, luego $|\mathcal{P}\omega|^{M[G']} = |\kappa|^{M[G']} \leq \kappa$, es decir, $(2^{\aleph_0})^{M[G']} \leq \kappa$.

Ahora bien, según 5.23 tenemos que $|\mathcal{P}\omega|^{M[G']} = (2^{\aleph_0})^{M[G']} = \mu > \kappa$, contradicción. ■

Nota El teorema anterior prueba en realidad la consistencia de $ZFC + \mathcal{P}\omega$ no puede ser bien ordenado en $L(\mathcal{P}\omega)$, en particular la consistencia (con ZFC) de que $L(\mathcal{P}\omega)$ no cumpla el axioma de elección. En virtud de 6.27 podemos concluir también que (en ZF) el principio de elecciones dependientes no permite probar que $\mathcal{P}\omega$ pueda ser bien ordenado. ■

6.3 Modelos simétricos

Además de probar que el axioma de elección no es demostrable en ZF, es interesante determinar qué resultados requieren el axioma de elección para ser demostrados. Por ejemplo, ya hemos visto que “ $\mathcal{P}\omega$ puede ser bien ordenado” es uno de ellos. Esto requiere construir modelos de ZF en los que fallen determinados enunciados, lo cual a su vez requiere técnicas “de precisión” para conseguir modelos de ZF con características muy concretas.

En esta sección presentamos una técnica para construir modelos de ZF ideada por von Neumann que no es compatible con el axioma de regularidad, pero en la sección siguiente veremos que los argumentos que emplearemos aquí pueden adaptarse para obtener extensiones genéricas con las mismas propiedades y en las que sí que se cumple el axioma de regularidad. Salvo por algunas definiciones básicas sobre grupos que introduciremos aquí y que necesitaremos después (6.31, 6.34 y 6.36), el lector puede omitir los resultados de esta sección y pasar directamente a la siguiente. La única utilidad de esta sección es que presenta más claramente las ideas importantes del argumento, al no “mezclarlas” con la teoría de extensiones genéricas, por lo que constituyen una buena aproximación al problema de violar el axioma de elección.

En esta sección trabajamos en la teoría ZFCA definida en [LM 12.25] y cuya consistencia (relativa a la consistencia de ZFC) está probada en [LM 12.26]. Vamos a recordarla brevemente:

En ZFC menos el axioma de regularidad podemos definir la clase de todos los *átomos* como

$$A = \{x \mid x = \{x\}\}.$$

Obviamente el axioma de regularidad implica que $A = \emptyset$, pero aquí vamos a tomar como axioma que A es un conjunto (posiblemente no vacío). Además, construimos la jerarquía

$$R_0(A) = A, \quad R_{\alpha+1}(A) = \mathcal{P}R_\alpha(A), \quad R_\lambda(A) = \bigcup_{\delta < \lambda} R_\delta(A),$$

$$R(A) = \bigcup_{\alpha \in \Omega} R_\alpha(A).$$

La teoría ZFCA es la que resulta de añadir a ZFC menos el axioma de regularidad los axiomas “ A es un conjunto” y $V = R(A)$. Según hemos indicado, [TC 12.26] prueba que si ZFC es consistente también lo es ZFCA + A es infinito numerable.⁴

Notemos que la sucesión $\{R_\alpha(A)\}_{\alpha \in \Omega}$ es una sucesión creciente de conjuntos transitivos.

Lo que podemos hacer con ZFCA que no podemos hacer con ZFC es construir automorfismos de la clase universal. Para ello definimos el conjunto Σ_A de todas las permutaciones de A , es decir, de todas las aplicaciones $f : A \rightarrow A$ biyectivas.

Si $f \in \Sigma_A$, definimos como sigue una sucesión transfinita automorfismos $f_\alpha : R_\alpha(A) \rightarrow R_\alpha(A)$, es decir, de aplicaciones biyectivas que cumplen

$$\bigwedge xy \in R_\alpha(A) (x \in y \leftrightarrow f_\alpha(x) \in f_\alpha(y)).$$

Notemos que esto equivale a que $\bigwedge y \in R_\alpha(A) f_\alpha(y) = f_\alpha[y]$.

Tomamos $f_0 = f : R_0(A) \rightarrow R_0(A)$, que trivialmente es un automorfismo, porque los elementos de A son átomos.

Supuesto definido el automorfismo f_α , definimos $f_{\alpha+1} : \mathcal{P}R_\alpha(A) \rightarrow \mathcal{P}R_\alpha(A)$ mediante $f_{\alpha+1}(x) = f_\alpha[x]$. De este modo, si $x \in R_\alpha(A) \subset R_{\alpha+1}(A)$, se cumple que $f_{\alpha+1}(x) = f_\alpha[x] = f_\alpha(x)$, luego $f_{\alpha+1}$ extiende a f_α . Además la definición de $f_{\alpha+1}$ puede reescribirse ahora en la forma $\bigwedge x \in R_{\alpha+1}(A) f_{\alpha+1}(x) = f_{\alpha+1}[x]$, con lo que $f_{\alpha+1}$ es un automorfismo.

Por último, si tenemos definidas $\{f_\delta\}_{\delta < \lambda}$ de modo que sean automorfismos y cada cual extienda a los anteriores, basta definir $f_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} f_\delta$, y claramente es un automorfismo que extiende a los anteriores.

⁴La prueba se adapta fácilmente para probar que también es consistente que A no sea numerable, pero sólo vamos a necesitar este caso en la práctica.

Finalmente, podemos definir $\bar{f} = \bigcup_{\alpha \in \omega} f_\alpha : V \longrightarrow V$, que es claramente un automorfismo de la clase universal. Concretamente, se cumplen las propiedades siguientes, cuya prueba dejamos a cargo del lector:

Teorema 6.30 *Sean $f, g \in \Sigma_A$. Entonces:*

- a) $\bar{f} : V \longrightarrow V$ biyectiva.
- b) $\bigwedge xy(x \in y \leftrightarrow \bar{f}(x) \in \bar{f}(y))$.
- c) $\bigwedge x \bar{f}(x) = \bar{f}[x]$.
- d) $\bar{f}|_A = f$.
- e) $\bar{1} = 1$ (donde el primer 1 representa a la identidad en A y el segundo es la identidad en V).
- f) $\overline{f \circ g} = \bar{f} \circ \bar{g}$.
- g) $\overline{f^{-1}} = \bar{f}^{-1}$.

En lo sucesivo escribiremos f en lugar de \bar{f} . En la práctica, en virtud de la construcción precedente podemos hacer actuar cualquier $f \in \Sigma_A$ sobre cualquier conjunto, aunque no sea un átomo.

Ejemplo Un conjunto “típico” de ZFCA es

$$x = \{\{a, \{b, c\}\}, \{\{\emptyset\}, \{a, \emptyset\}\}\},$$

donde a, b y c son átomos, es decir, los conjuntos de ZFCA están construidos a partir de \emptyset y de los átomos. Si $f \in \Sigma_A$, entonces

$$f(x) = \{\{f(a), \{f(b), f(c)\}\}, \{\{\emptyset\}, \{f(a), \emptyset\}\}\}.$$

Podemos decir que $f(x)$ es un conjunto construido con los mismos “planos” que x pero con diferentes “ladrillos”. ■

La idea básica de la teoría que vamos a exponer aquí es que podemos “medir” la simetría de un conjunto mediante el conjunto de elementos de Σ_A que lo dejan invariante,⁵ y la clase de todos los conjuntos “suficientemente simétricos”, en un sentido que tenemos que precisar, será un modelo de ZFA, es decir, de ZFCA sin el axioma de elección, debido a que este axioma postula la existencia de conjuntos “poco simétricos”.

Para precisar estas ideas conviene introducir algunos elementos de la teoría de grupos. En general, un *grupo* es un par (G, \cdot) , donde G es un conjunto y \cdot es

⁵La analogía geométrica que sugiere el uso de la palabra “simetría” en este contexto abstracto es que, por ejemplo, un cuadrado es “más simétrico” que un rectángulo, porque sólo hay cuatro isometrías que dejan invariante a un rectángulo (dos simetrías y dos giros, uno de ellos la identidad), mientras que hay ocho isometrías que dejan invariante a un cuadrado (cuatro simetrías y cuatro giros, contando la identidad).

una operación en G asociativa, con elemento neutro, y respecto a la que todo elemento tiene un inverso. Sin embargo, aquí sólo necesitamos trabajar con grupos de permutaciones, en el sentido de la definición siguiente:

Definición 6.31 Si A es un conjunto,⁶ llamamos *grupo simétrico* de A al conjunto Σ_A de todas las *permutaciones* (aplicaciones biyectivas) $f : A \rightarrow A$.

Diremos que $G \subset \Sigma_A$ es un *subgrupo* de Σ_A si cumple:

- a) $\bigwedge f g \in G$ $f \circ g \in G$.
- b) $1 \in G$, donde 1 representa a la identidad en A .
- c) $\bigwedge f \in G$ $f^{-1} \in G$.

Si $H \subset G$ son dos subgrupos de Σ_A diremos también que H es un subgrupo de G .

Definición 6.32 Si H es un subgrupo de Σ_A y $x \in V$, definimos el *grupo de simetrías* de x en H como

$$\text{Sim}_H(x) = \{f \in H \mid f(x) = x\}.$$

Es claro que $\text{Sim}_H(x)$ es un subgrupo de H .

Así, un conjunto es “más simétrico” cuanto mayor es su grupo de simetrías. Por ejemplo, dados dos átomos a y b , el par desordenado $\{a, b\}$ es más simétrico que el par ordenado (a, b) , pues, como $f(\{a, b\}) = \{f(a), f(b)\}$, el grupo de simetrías $\text{Sim}_G(\{a, b\})$ está formado por todas las permutaciones de G que fijan o intercambian a y b , mientras que, como $f((a, b)) = (f(a), f(b))$, el grupo $\text{Sim}_G((a, b))$ está formado únicamente por las permutaciones de G que fijan a a y a b .

Es evidente que $\text{Sim}_H(A) = H$, por lo que A es totalmente simétrico. Lo mismo les sucede a todos los conjuntos regulares:

Teorema 6.33 Si H es un subgrupo de Σ_A y $x \in R$, entonces $\text{Sim}_H(x) = H$.

DEMOSTRACIÓN: Sea $f \in H$. Hemos de probar que $f(x) = x$ para todo $x \in R$. Como la relación de pertenencia está bien fundada en R podemos probarlo por \in -inducción. Suponemos que $f(u) = u$ para todo $u \in x$ y vemos entonces que

$$f(x) = \{f(u) \mid u \in x\} = \{u \mid u \in x\} = x. \quad \blacksquare$$

Ahora necesitamos resolver el problema siguiente: dado $f \in \Sigma_A$ y un conjunto x , el conjunto $f(x)$ tiene la misma estructura que x , luego es de esperar que x y $f(x)$ tengan grupos de simetrías similares. Concretamente, ¿cuál es la relación entre $\text{Sim}_H(x)$ y $\text{Sim}_H(f(x))$? Para responder a esta pregunta introducimos algunos conceptos más:

⁶En esta sección A será siempre el conjunto de átomos, pero en la sección siguiente aplicaremos esta definición a otros conjuntos.

Definición 6.34 Si A es un conjunto y $f, g \in \Sigma_A$, definimos el *conjugado* de g por f como $g^f = f^{-1} \circ g \circ f$.

Si G es un subgrupo de Σ_A definimos el *subgrupo conjugado* de G por f como

$$G^f = \{g^f \mid g \in G\},$$

que claramente es también un subgrupo de Σ_A .

Teorema 6.35 Si H es un subgrupo de Σ_A , $f \in \Sigma_A$ y $x \in V$, entonces

$$\text{Sim}_H(f(x)) = \text{Sim}_H(x)^f.$$

DEMOSTRACIÓN: Sea $g \in \text{Sim}_H(x)^f$. Entonces existe un $u \in \text{Sim}_H(x)$ tal que $g = u^f$. Así pues, $g(f(x)) = f(u(f^{-1}(f(x))) = f(u(x)) = f(x)$. Esto prueba que $g \in \text{Sim}_H(x)$.

Recíprocamente, si $g \in \text{Sim}_H(x)$ tenemos que $g(f(x)) = f(x)$, de donde se sigue que $f^{-1}(g(f(x))) = x$, lo cual quiere decir que $u = fgf^{-1} \in \text{Sim}_H(x)$ y, por consiguiente $g = f^{-1}uf = u^f \in \text{Sim}_H(x)^f$. ■

Ahora marcamos la frontera entre los conjuntos “suficientemente simétricos” y los que no lo son. Para ello introducimos el concepto siguiente:

Definición 6.36 Sea H un subgrupo de Σ_A . Un *filtro de subgrupos* de H es una familia \mathcal{F} de subgrupos de H tal que

- a) $H \in \mathcal{F}$,
- b) Si $G \in \mathcal{F}$ y K es un subgrupo de H tal que $G \subset K \subset H$, entonces $K \in \mathcal{F}$,
- c) Si $G, K \in \mathcal{F}$, entonces $G \cap K \in \mathcal{F}$.

Diremos que \mathcal{F} es un *filtro normal* si además verifica que si $K \in \mathcal{F}$ y $f \in H$, entonces $K^f \in \mathcal{F}$.

La idea es que \mathcal{F} determina una familia de subgrupos de H a los que podemos llamar “grandes” (H es grande, todo subgrupo que contenga un subgrupo grande es grande, etc.) Ahora definimos los conjuntos simétricos como los que tienen un grupo de simetrías grande:

Definición 6.37 Si H es un subgrupo de Σ_A y \mathcal{F} es un filtro normal de subgrupos de H , definimos la clase de los conjuntos *simétricos* (respecto de H y \mathcal{F}) como

$$S = \{x \mid \text{Sim}_H(x) \in \mathcal{F}\}.$$

Ejemplo Supongamos⁷ que $A = \{a, b, c\}$, que $H = \Sigma_A$ y que $\mathcal{F} = \{H\}$. Entonces

$$\{\{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}\} \in S,$$

pero $\{a, b\} \notin S$. Esto muestra que la clase S no tiene por qué ser transitiva. ■

⁷Aunque estamos suponiendo que A es infinito, en este ejemplo lo tomamos finito por simplicidad. Es fácil construir un ejemplo análogo con A infinito.

En vista de este ejemplo, pasamos a considerar conjuntos hereditariamente simétricos:

Definición 6.38 Sea H un subgrupo de Σ_A y \mathcal{F} un filtro normal de subgrupos de H . Definimos la clase de los conjuntos *hereditariamente simétricos* (respecto de H y \mathcal{F}) como

$$HS = \{x \in S \mid \text{ct } x \subset S\}.$$

Así, los conjuntos hereditariamente simétricos son los conjuntos simétricos tales que sus elementos son simétricos y los elementos de sus elementos son simétricos, etc. El teorema siguiente contiene sus propiedades básicas:

Teorema 6.39 *Sea H un subgrupo de Σ_A y \mathcal{F} un filtro normal de subgrupos de H . Entonces*

- a) *La clase HS es transitiva.*
- b) $\bigwedge x(x \in HS \leftrightarrow x \in S \wedge x \subset HS),$
- c) $R \subset HS,$
- d) *Si $f \in H$, entonces $f|_{HS} : HS \rightarrow HS$ biyectiva.*

DEMOSTRACIÓN: a) Si $u \in x \in HS$, entonces $\text{ct } u \subset \text{ct } x \subset S$ y $u \in \text{ct } x \subset S$, luego $u \in HS$.

b) Si $x \in S \wedge x \subset HS$, como HS es una clase transitiva, $\text{ct } x \subset HS \subset S$, luego $x \in HS$. El recíproco es obvio.

c) Para probar que $R \subset HS$ razonamos por \in -inducción, suponemos que $x \in R$ cumple $x \subset HS$ y hemos de probar que $x \in HS$. Por el apartado anterior basta ver que $x \in S$, pero sabemos que $\text{Sim}_H(x) = H \in \mathcal{F}$.

d) En primer lugar observamos que si $x \in S$ entonces $f(x) \in S$, pues si $x \in S$ entonces $\text{Sim}_H(x) \in \mathcal{F}$, luego $\text{Sim}_H(f(x)) = \text{Sim}_H(x)^f \in \mathcal{F}$ por la condición de normalidad.

Supongamos ahora que existe un conjunto $x \in HS$ tal que $f(x) \notin HS$. Podemos tomar el mínimo ordinal α tal que existe un conjunto $x \in R_\alpha(A)$ en estas condiciones. Obviamente α no puede ser un límite. Si $\alpha = 0$ entonces x es un átomo, luego $f(x)$ también lo es. Hemos visto que $f(x) \in S$, y al ser un átomo $\text{ct } f(x) = f(x) \subset S$, luego $f(x) \in HS$, contradicción.

Si $\alpha = \beta + 1$ entonces $x \subset R_\beta(A)$ y por la minimalidad de α ha de ser $f(x) = f[x] \subset HS$. Como $f(x) \in S$, de hecho $f(x) \in HS$, contradicción.

Con esto hemos probado que $f|_{HS} : HS \rightarrow HS$. Lo mismo vale para f^{-1} , y $(f^{-1})|_{HS}$ resulta ser la inversa de $f|_{HS}$. Así pues, $f|_{HS} : HS \rightarrow HS$ biyectiva. ■

Es evidente que los automorfismos de una clase transitiva conservan las fórmulas. Concretamente:

Teorema 6.40 *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula de \mathcal{L}_m . Entonces en ZFCA se demuestra que si H es un subgrupo de Σ_A , \mathcal{F} es un filtro normal de subgrupos de H y $f \in H$, entonces*

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in HS(\phi^{HS}(x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow \phi^{HS}(f(x_1), \dots, f(x_n))).$$

Esto se prueba por inducción sobre la longitud de ϕ probando simultáneamente la versión correspondiente para términos, es decir,

$$\bigwedge x_1 \cdots x_n \in HS(f(t^{HS}(x_1, \dots, x_n)) = t^{HS}(f(x_1), \dots, f(x_n))).$$

Ahora estamos en condiciones de probar el resultado básico:

Teorema 6.41 *Si H es un subgrupo de Σ_A y \mathcal{F} es un filtro normal de subgrupos de H entonces HS es un modelo transitivo de ZFA.*

DEMOSTRACIÓN: Como HS es transitivo, cumple el axioma de extensiónalidad.

Para comprobar el axioma del par tomamos $x, y \in HS$. Consideremos una permutación $f \in \text{Sim}_H(x) \cap \text{Sim}_H(y)$. Claramente

$$f(\{x, y\}) = \{f(x), f(y)\} = \{x, y\}.$$

Con esto hemos probado que $\text{Sim}_H(x) \cap \text{Sim}_H(y) \subset \text{Sim}_H(\{x, y\})$, luego $\text{Sim}_H(\{x, y\}) \in \mathcal{F}$ y $\{x, y\} \in S$. Puesto que obviamente $\{x, y\} \subset HS$, tenemos, de hecho, que $\{x, y\} \in HS$.

Para el axioma de la unión tomamos $x \in HS$ y vamos a probar que

$$\text{Sim}_H(x) \subset \text{Sim}_H(\bigcup x).$$

En efecto, si $f \in \text{Sim}_H(x)$, entonces

$$f\left(\bigcup_{u \in x} u\right) = f\left[\bigcup_{u \in x} u\right] = \bigcup_{u \in x} f[u] = \bigcup_{u \in x} f(u) = \bigcup_{u \in x} u.$$

porque, como $f[x] = x$, resulta que f permuta los conjuntos $u \in x$. Esto prueba que la unión es simétrica, pero por transitividad $\bigcup_{u \in x} u \subset HS$, luego la unión es hereditariamente simétrica.

Para el axioma de reemplazo consideramos una fórmula $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n)$, fijamos $x_1, \dots, x_n \in HS$ y suponemos que

$$\bigwedge xyz \in HS(\phi^{HS}(x, y) \wedge \phi^{HS}(x, z) \rightarrow y = z).$$

A su vez, fijamos $a \in HS$ y tenemos que probar que

$$b = \{y \in HS \mid \bigvee x \in a \phi^{HS}(x, y, x_1, \dots, x_n)\} \in HS.$$

Como $b \subset HS$, sólo hay que probar que $b \in S$. Para ello probaremos que

$$\text{Sim}_H(a) \cap \text{Sim}_H(x_1) \cap \cdots \cap \text{Sim}_H(x_n) \subset \text{Sim}_H(b).$$

Tomamos una permutación f en la intersección de los grupos de simetrías. Si $y \in b$ entonces existe $x \in a$ tal que $\phi^{HS}(x, y, x_1, \dots, x_n)$. Por el teorema anterior $\phi^{HS}(f(x), f(y), x_1, \dots, x_n)$ y $f(x) \in f(a) = a$, luego $f(y) \in b$. Esto prueba que $f[b] \subset b$ y el mismo razonamiento aplicado a f^{-1} nos da que $f^{-1}[b] \subset b$, que equivale a $b \subset f[b]$, luego tenemos la igualdad y $f \in \text{Sim}_H(b)$.

Como $\Omega \subset R \subset HS$ tenemos que HS cumple el axioma de infinitud.

Para probar el axioma de partes tomamos $x \in HS$ y hemos de ver que $\mathcal{P}x \cap HS \in HS$. Como $\mathcal{P}x \cap HS \subset HS$, sólo hay que probar que $\mathcal{P}x \cap HS \in S$. Para ello basta ver que $\text{Sim}_H(x) \subset \text{Sim}_H(\mathcal{P}x \cap HS)$.

Si $f \in \text{Sim}_H(x)$ y $u \in \mathcal{P}x \cap HS$, entonces $u \subset x$, luego

$$f(u) = f[u] \subset f[x] = f(x) = x,$$

luego $f(u) \in \mathcal{P}x \cap HS$. Con esto hemos probado que $f[\mathcal{P}x \cap HS] \subset \mathcal{P}X \cap HS$. Razonando con f^{-1} tenemos la otra inclusión, luego $f(\mathcal{P}x \cap HS) = \mathcal{P}X \cap HS$.

Con esto tenemos que HS es un modelo de ZF. Para probar que es un modelo de ZFA observamos primero que “ x es un ordinal” es absoluto para HS . En efecto, en ZF se demuestra que

$$x \text{ es un ordinal} \rightarrow x \text{ es transitivo} \wedge x \text{ es conexo} \wedge x \text{ no contiene átomos},$$

y en ZFA se demuestra también la implicación contraria (en general, un conjunto transitivo y sin átomos está bien fundado). En particular ser un ordinal es Δ_0 en ZFA. No obstante esto no nos vale porque todavía no sabemos que HS sea un modelo de ZFA.

Ahora bien, si α es un ordinal, entonces α es un ordinal HS , porque ser un ordinal es Π_1 en cualquier caso, y si α es un ordinal HS , entonces α es (transitivo, conexo y sin átomos) HS , luego cumple todo esto sin relativizar (porque todo es Δ_0) y, como estamos trabajando en ZFCA, esto implica que α es un ordinal.

Ahora es claro que ser un ordinal límite o un ordinal sucesor también es absoluto para HS . Seguidamente demostramos por inducción sobre α que

$$\bigwedge \alpha R_\alpha(A)^{HS} = R_\alpha(A) \cap HS.$$

En efecto, para $\alpha = 0$ relativizamos $\bigwedge x(x \in R_0(A) \leftrightarrow x \text{ es un átomo})$ y así obtenemos $\bigwedge x(x \in R_0(A)^{HS} \leftrightarrow x \in A \cap HS)$, luego

$$R_0(A)^{HS} = A \cap HS = R_0(A) \cap HS.$$

Supuesto cierto para α , relativizamos $R_{\alpha+1}(A) = \mathcal{P}R_\alpha(A)$, con lo que

$$\begin{aligned} R_{\alpha+1}(A)^{HS} &= \mathcal{P}^{HS}R_\alpha(A)^{HS} = \mathcal{P}R_\alpha(A)^{HS} \cap HS \\ &= \mathcal{P}(R_\alpha(A) \cap HS) \cap HS = \mathcal{P}R_\alpha(A) \cap HS = R_{\alpha+1}(A) \cap HS. \end{aligned}$$

Para el caso límite relativizamos $\bigwedge x(x \in R_\lambda(A) \leftrightarrow \bigvee \delta < \lambda x \in R_\delta(A))$. El resultado es

$$\bigwedge x(x \in R_\lambda(A)^{HS} \leftrightarrow \bigvee \delta < \lambda x \in R_\delta(A)^{HS}).$$

Si suponemos que $R_\delta(A)^{HS} = R_\delta(A) \cap HS$ la conclusión es que

$$R_\lambda(A)^{HS} = \bigcup_{\delta < \lambda} R_\delta(A) \cap HS = R_\lambda(A) \cap HS.$$

Para terminar, si $x \in HS$ entonces existe un α tal que $x \in R_\alpha(A) \cap HS$, luego $\bigwedge x \in HS \bigvee \alpha \in HS \ x \in R_\alpha(A)^{HS}$, lo cual equivale a

$$(\bigwedge x \bigvee \alpha \ x \in R_\alpha(A))^{HS},$$

y esto es $(V = R(A))^{HS}$. ■

En principio los átomos no tienen por qué ser simétricos, por lo que puede ocurrir que $A^{HS} = \emptyset$ y HS cumpla el axioma de regularidad (y entonces cumple automáticamente el axioma de elección). A continuación veremos cómo definir un filtro normal de subgrupos que asegure la simetría de los átomos.

Definición 6.42 Sea H un subgrupo de Σ_A . Para cada $B \subset A$ definimos el *estabilizador* de B en H como

$$\text{Est}_H(B) = \{f \in H \mid \bigwedge x \in B \ f(x) = x\}.$$

Se comprueba inmediatamente que $\text{Est}_H(B)$ es un subgrupo de H , así como que si $f \in H$ entonces $\text{Est}_H(f[B]) = \text{Est}_H(B)^f$.

Definimos el *filtro de soportes finitos* de H como el filtro dado por

$$\mathcal{F}_H = \{G \mid G \text{ es subgrupo de } H \wedge \bigvee B (B \subset A \wedge B \text{ finito} \wedge \text{Est}_H(B) \subset G)\}.$$

Es fácil ver que \mathcal{F}_H es ciertamente un filtro normal de subgrupos de H . Para la propiedad de la intersección se usa que, claramente,

$$\text{Est}_H(B \cup C) \subset \text{Est}_H(B) \cap \text{Est}_H(C).$$

Respecto a este filtro, un conjunto x es simétrico si existe un conjunto finito de átomos B tal que $\text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(x)$, es decir, si para que un automorfismo fije a x es suficiente que fije a un cierto conjunto finito B de átomos. Se dice entonces que B es un *soporte* de x .

En particular, si x es un átomo tenemos que $\text{Est}_H(\{x\}) \subset \text{Sim}_H(x)$, luego $x \in S$, que es tanto como decir $x \in HS$. Por consiguiente se cumple que $A \subset HS$, y como $\text{Sim}_H(A) = H$, tenemos que $A \in S$ y por tanto $A \in HS$.

Veamos finalmente el comportamiento de HS respecto al axioma de elección. Observemos que en ZFA podemos definir el rango de un conjunto x como el mínimo ordinal α tal que $x \subset R_\alpha(A)$, y así los conjuntos de rango 0 son \emptyset y los átomos. Con esta definición de rango, la definición de cardinal dada en [TC 4.6] vale igualmente en ZFA, al igual que toda la teoría de cardinales desarrollada a continuación (sin el axioma de elección). En particular, podemos considerar la clase \mathfrak{C} de todos los cardinales.

Teorema 6.43 Supongamos que A es infinito numerable, sea $H = \Sigma_A$ y sea HS el modelo simétrico construido con el filtro de soportes finitos. Sea \mathfrak{p} el cardinal de A en HS . Entonces en HS se cumple:

- a) A es infinito, pero todos sus subconjuntos son finitos o cofinitos (es decir, de complementario finito).
- b) A no tiene subconjuntos (infinitos) numerables.
- c) A no puede ser totalmente ordenado.
- d) Los cardinales menores que \mathfrak{p} son exactamente:

$$0 < 1 < 2 < 3 < 4 \dots \quad \dots < \mathfrak{p} - 4 < \mathfrak{p} - 3 < \mathfrak{p} - 2 < \mathfrak{p} - 1,$$

con lo que la clase \mathfrak{C} no está ni totalmente ordenada ni bien fundada.

- e) Se cumple

$$\mathfrak{p} < \mathfrak{p} + 1 < \mathfrak{p} + 2 < \dots < \mathfrak{p} + \mathfrak{p} < \mathfrak{p}^2 < \mathfrak{p}^3 < \dots$$

- f) No se cumple $\mathfrak{p}^2 \leq 2^\mathfrak{p}$ (compárese con [TC 4.72] y la nota posterior).

DEMOSTRACIÓN: a) Se cumple que A es infinito^{HS} porque ser infinito es absoluto. Sea $x \subset A$, $x \in HS$ y supongamos que no es finito^{HS} ni cofinito^{HS}, es decir, que no es finito ni cofinito. Sea $B \subset A$ un soporte finito de x . Como x y $A \setminus x$ son infinitos, existen átomos u, v tales que $u \in x \setminus B$ y $v \in (A \setminus x) \setminus B$. Sea $g \in \Sigma_A$ la permutación que cumple $g(u) = v$, $g(v) = u$ y deja fijos a los demás átomos. Entonces $g \in \text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(x)$, luego $g(x) = x$, pero como $u \in x$ se cumple que $v = g(u) \in g(x) = x$, lo cual es una contradicción. Así pues, x ha de ser finito o cofinito.

b) es consecuencia de a): un conjunto cuyos subconjuntos sean todos finitos o cofinitos no puede tener subconjuntos infinitos numerables, pues un conjunto infinito numerable se puede descomponer en unión de dos conjuntos infinitos numerables disjuntos, y ambos serían subconjuntos infinitos no cofinitos del conjunto de partida.

c) también se sigue de a): Si A pudiera ser totalmente ordenado por una relación \leq , definimos $B = \{x \in A \mid \{u \in A \mid u < x\} \text{ es finito}\}$. O bien B o bien $A \setminus B$ es finito. Podemos suponer que lo es $A \setminus B$, pues si lo fuera B cambiaríamos la relación de orden por su inversa.

Entonces \leq es un buen orden en B , pues si $X \subset B$ es no vacío y $x \in X$, entonces $\{u \in A \mid u < x\}$ es finito, luego $\{u \in X \mid u \leq x\}$ también lo es, luego tiene un mínimo elemento m , que también es mínimo de X .

Así pues B tiene un buen orden y $A \setminus B$ también porque es finito, luego A admite un buen orden. Ahora bien, un conjunto infinito que admite un buen orden puede biyectarse con un ordinal infinito, y la restricción a ω de dicha biyección nos da un subconjunto infinito numerable en A , contradicción.

d) Todo conjunto finito de átomos está en HS , por lo que A tiene (en HS) subconjuntos de todos los cardinales finitos. Si $x \subset A$ tiene cardinal n , llamemos $\mathfrak{p} - n$ al cardinal (en HS) de $A \setminus x$. Es fácil probar en ZF que este cardinal no depende de la elección de x . A su vez, la notación $\mathfrak{p} - n$ está justificada porque, según la definición usual de suma de cardinales, se cumple $(\mathfrak{p} - n) + n = \mathfrak{p}$. En particular esto prueba que $\mathfrak{p} - n$ es infinito. Por a) sabemos que los únicos cardinales (en HS) menores que \mathfrak{p} son los de la forma n o $\mathfrak{p} - n$. Falta probar que son todos distintos y que están ordenados.

Sean $n \leq m$ cardinales finitos. Tomemos $x \subset y \subset A$ de cardinales $m - n$ y n respectivamente. Así $(A \setminus y) \cup (y \setminus x) = A \setminus x$, luego $(\mathfrak{p} - m) + n = \mathfrak{p} - (m - n)$. En particular $\mathfrak{p} - m \leq \mathfrak{p} - (m - n)$. Con esto tenemos las desigualdades

$$0 < 1 < 2 < 3 < 4 \cdots \quad \cdots \leq \mathfrak{p} - 4 \leq \mathfrak{p} - 3 \leq \mathfrak{p} - 2 \leq \mathfrak{p} - 1.$$

Basta probar que $\mathfrak{p} - 1 \neq \mathfrak{p}$, pues entonces $\mathfrak{p} - n \neq \mathfrak{p} - (n - 1)$, ya que sumando $n - 1$ contradiríamos la primera desigualdad. Ahora bien, esto es una consecuencia de que A no tiene subconjuntos infinitos numerables. Más concretamente, en ZF se demuestra que si A no tiene subconjuntos numerables entonces su cardinal \mathfrak{p} ha de cumplir $\mathfrak{p} \neq \mathfrak{p} - 1$, pues en caso contrario tenemos un $a \in A$ y una biyección $f : A \longrightarrow A \setminus \{a\}$, que nos permite definir la sucesión $a_0 = a$, $a_{n+1} = f(a_n)$, y es fácil probar que $\{a_n \mid n \in \omega\}$ es un subconjunto infinito numerable de A .

En particular la clase \mathfrak{C} no está totalmente ordenada porque \mathfrak{p} no es comparable con \aleph_0 .

e) Las desigualdades $\mathfrak{p} < \mathfrak{p} + 1 < \mathfrak{p} + 2 < \cdots$ se deben a que si x es un conjunto de cardinal n disjunto con A , entonces $A \cup x$ no puede tener subconjuntos infinitos numerables, luego, según hemos visto en el apartado anterior, su cardinal $\mathfrak{p} + n$ cumple que $\mathfrak{p} + n - 1 < \mathfrak{p} + n$.

La desigualdad $\mathfrak{p} + \mathfrak{p} \leq \mathfrak{p}^2$ es general. Si se diera la igualdad existiría $f : 2 \times A \longrightarrow A \times A$ biyectiva $f \in HS$. Sea B un soporte finito de f y sean $v, w \in A \setminus B$ dos átomos distintos. Sea $f(i, u) = (v, w)$ y supongamos que $u \neq v$ (si no sería $u = w$ y razonaríamos igual). Sea $z \in A \setminus B$ distinto de u, v, w y sea $g \in \Sigma_A$ la permutación que intercambia v y z . Entonces $g(f) = f$ y haciendo actuar g sobre $f(i, u) = (v, w)$ obtenemos que $f(i, u) = (z, g(w))$, luego $v = z$, contradicción.

Las desigualdades $\mathfrak{p}^2 < \mathfrak{p}^3 < \cdots$ se demuestran mediante un argumento similar.

f) Supongamos que existe una aplicación $f : A \times A \longrightarrow \mathcal{P}A \cap HS$ inyectiva tal que $f \in HS$. Sea B un soporte finito para f y sean $u, v \in A \setminus B$ dos átomos distintos. Tomemos $x = f(u, v)$ o $x = A \setminus f(u, v)$ de modo que x sea finito. Si u y v están ambos en x o ninguno lo está, permutándolos obtenemos que $f(u, v) = f(v, u)$, contradicción (porque en este caso el automorfismo que los permuta fija a x). Si $u \in x$ y $v \notin x$ (o viceversa) tomamos $w \in A \setminus x$ que no esté en B (esto es posible porque $A \setminus x$ es infinito). Al permutar v y w resulta $f(u, v) = f(u, w)$, contradicción. ■

En el modelo siguiente el axioma de elección es violado de la forma más drástica posible:

Teorema 6.44 *Supongamos que A es infinito numerable y descompongámolo en una unión disjunta $A = \bigcup_{n \in \omega} P_n$, de pares $P_n = \{a_n, b_n\}$ con $a_n \neq b_n$.*

Consideremos el grupo $H = \{f \in \Sigma_A \mid \bigwedge n \in \omega f(P_n) = P_n\}$ y sea HS el modelo simétrico formado con el correspondiente filtro de soportes finitos. Entonces en HS se cumple que $P = \{P_n \mid n \in \omega\}$ es una familia numerable de pares desordenados que no tiene función de elección. En particular A es una unión numerable de conjuntos de cardinal 2, pero no es numerable.

DEMOSTRACIÓN: Todos los pares P_n son simétricos por la definición de H . Como $P_n \subset A \subset HS$, de hecho $P_n \in HS$. Sea $f : \omega \rightarrow P$ dada por $f(n) = P_n$. La aplicación f no es sino el conjunto $f = \{(n, P_n) \mid n \in \omega\}$, y si $g \in H$ se cumple que $g(f) = \{(g(n), g(P_n)) \mid n \in \omega\} = f$, pues g fija tanto a los números naturales como a los pares P_n . Así pues $f \in S$ y, como HS es un modelo de ZF, es cerrado para pares ordenados, de modo que $f \subset HS$ y concluimos que $f \in HS$. Así mismo, como el rango es un concepto absoluto, P , que es el rango de f , está en HS . Con esto no sólo hemos probado que $P \in HS$ sino que, de hecho, P es numerable^{HS}.

Supongamos que P tuviera una función de elección $h \in HS$, es decir, suponemos que $h : P \rightarrow A$ cumple que $h(P_n) \in P_n$. Sea B un soporte finito para h y tomemos un $n \in \omega$ tal que $a_n, b_n \notin B$. Sea g la permutación que intercambia a_n con b_n . Es claro que $g \in H$ y $g(h) = h$. Ahora bien, si, por ejemplo, $h(P_n) = a_n$, al aplicar g obtenemos que $g(h)(g(P_n)) = g(a_n)$, es decir, $h(P_n) = b_n$, contradicción, e igualmente si $h(P_n) = b_n$. En consecuencia no existe tal h .

Notemos que si A fuera numerable tendría un buen orden que determinaría una función de elección sobre P . ■

No damos más ejemplos, ni incidimos más en las consecuencias de los que hemos dado, porque en la sección siguiente podremos obtener las mismas conclusiones sin negar el axioma de regularidad.

6.4 Extensiones simétricas

Veamos ahora cómo modificar la teoría de extensiones genéricas para obtener modelos en los que falle el axioma de elección y en los que se pueden adaptar los argumentos de la sección anterior, pero sin excluir al axioma de regularidad. Trabajamos en ZFC.

La idea básica es sustituir Σ_A por el conjunto $\text{Aut } \mathbb{P}$ de los automorfismos de un c.p.o. \mathbb{P} , que claramente es un subgrupo del grupo simétrico $\Sigma_{\mathbb{P}}$ (véase la definición 6.31). Igual que en ZFCA hemos probado que los elementos de Σ_A inducen automorfismos de la clase universal, ahora tenemos que cada elemento $f \in \text{Aut } \mathbb{P}$ determina una biyección $f : V^{\mathbb{P}} \rightarrow V^{\mathbb{P}}$.

Antes de entrar en la teoría propiamente dicha mostraremos un ejemplo simple en el que se ilustra cómo con estos elementos podemos aprovechar los argumentos empleados en la sección anterior (aunque en este ejemplo sólo lo haremos parcialmente, sin necesidad de considerar grupos de simetrías).

Sabemos que si $V = L$ entonces $x \sqsubseteq y$ es una fórmula con x e y como únicas variables libres que ordena bien a la clase universal, en particular a $\mathcal{P}\omega$, es decir, tenemos un criterio explícito (que no es lo mismo que verificable en casos concretos) que establece cuándo un subconjunto de ω es menor que otro, de modo que el orden así definido es, de hecho, un buen orden. Lo mismo sucede si $V = D(\Omega)$ con la relación de orden definida en el teorema 6.6.

Ahora probaremos que es consistente con ZFC que ninguna fórmula $\phi(x, y)$ con x e y como únicas variables libres determine un buen orden en $\mathcal{P}\omega$. Esto no contradice al axioma de elección: éste implica que existe una relación R que ordena bien $\mathcal{P}\omega$, pero la fórmula $x R y$ tiene tres variables libres, que es tanto como decir que no tenemos ninguna definición explícita de R .

Teorema 6.45 *Si ZFC es consistente también lo es ZFC + $\mathcal{P}\omega$ no puede ser bien ordenado por una fórmula.*

DEMOSTRACIÓN: Más concretamente, queremos probar que es consistente añadir a ZFC los infinitos axiomas de la forma

$$\{(x, y) \in \mathcal{P}\omega \times \mathcal{P}\omega \mid \phi(x, y)\} \text{ no es un buen orden en } \mathcal{P}\omega,$$

para toda fórmula $\phi(x, y)$.

Fijemos un modelo transitivo numerable M de ZFC + $V = L$ y consideremos el c.p.o. $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega \times \omega, 2, \aleph_0)$. Sea G un filtro genérico y supongamos que una fórmula $\phi(x, y)$ ordena bien $\mathcal{P}\omega$ en $M[G]$.

Consideremos la función genérica $f_G = \bigcup_{p \in G} p : \omega \times \omega \longrightarrow 2$. Para cada $i \in \omega$ definimos

$$a_i = \{n \in \omega \mid f_G(i, n) = 1\} \in (\mathcal{P}\omega)^{M[G]}.$$

Sea $A = \{a_i \mid i \in \omega\} \in M[G]$. El conjunto A va a desempeñar el papel que en la sección anterior desempeñaba el conjunto de átomos. Así, hemos sustituido los átomos por conjuntos genéricos. Definimos

$$\sigma_i = \{(\check{n}, p) \mid p \in \mathbb{P} \wedge (i, n, 1) \in p\} \in M^\mathbb{P},$$

$$\sigma = \{(\sigma_i, \mathbb{1}) \mid i \in \omega\} \in M^\mathbb{P}.$$

Claramente $a_i = \sigma_{iG}$ y $A = \sigma_G$. Veamos que si $i, j \in \omega$, $i \neq j$, entonces

$$\mathbb{1} \Vdash \sigma_i \neq \sigma_j.$$

En efecto, dado cualquier filtro genérico H , el conjunto

$$D_{ij} = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall n \in \omega ((i, n), (j, n) \in \mathcal{D}p \wedge p(i, n) \neq p(j, n))\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} , luego $H \cap D_{ij} \neq \emptyset$ y esto se traduce en que σ_{iH} y σ_{jH} se diferencian en un elemento n (que está en uno y no en otro).

Volviendo a $M[G]$, estamos suponiendo que $R = \{(x, y) \in \mathcal{P}\omega \times \mathcal{P}\omega \mid \phi(x, y)\}$ es un buen orden en $\mathcal{P}\omega$ (en $M[G]$), luego el conjunto $A \in M[G]$ debe tener un mínimo, digamos a_i . Existe una condición $p \in \mathbb{P}$ tal que

$$p \Vdash \forall R(R = \{(x, y) \in \mathcal{P}\omega \times \mathcal{P}\omega \mid \phi(x, y)\} \wedge R \text{ bien ordena } \mathcal{P}\omega \wedge \bigwedge z \in \sigma \sigma_i R z).$$

Como $\mathcal{D}p \subset \omega \times \omega$ es finito, podemos encontrar un $j \neq i$ que no aparezca como primera componente en ninguno de sus pares. Sea $g : \omega \rightarrow \omega$ la permutación que intercambia i con j y fija a los demás números. Sea $f : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{P}$ la aplicación dada por $f(r) = \{(g(u), v, w) \mid (u, v, w) \in r\}$, es decir, f intercambia i por j en las primeras componentes de los dominios de las condiciones. Es claro que $f : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{P}$ es una semejanza. Además $\neg p \perp f(p)$, pues los únicos pares en los que $f(p)$ se diferencia de p empiezan por j , luego no están en el dominio de p .

También es inmediato que $f(\sigma_i) = \sigma_j$, $f(\sigma_j) = \sigma_i$ y $f(\sigma_k) = \sigma_k$ cuando $i \neq k \neq j$. Esto implica a su vez que $f(\sigma) = \sigma$. Así pues, el teorema 4.45 nos da que

$$f(p) \Vdash \forall R(R = \{(x, y) \in \mathcal{P}\omega \times \mathcal{P}\omega \mid \phi(x, y)\}$$

$$\wedge R \text{ bien ordena } \mathcal{P}\omega \wedge \bigwedge z \in \sigma \sigma_j R z).$$

Sea $q \leq p \wedge q \leq f(p)$ y sea H un filtro genérico con $q \in H$. Tenemos que en $M[H]$ la relación $R = \{(x, y) \in \mathcal{P}\omega \times \mathcal{P}\omega \mid \phi(x, y)\}$ es un buen orden en $\mathcal{P}\omega$ tal que $\sigma_{iG} R \sigma_{jG} \wedge \sigma_{jG} R \sigma_{iG}$, pero esto implica que $\sigma_{iG} = \sigma_{jG}$, cuando por otra parte $\mathbf{1} \Vdash \sigma_i \neq \sigma_j$, contradicción. ■

Veamos ahora cómo construir modelos en los que falle el axioma de elección:

Definición 6.46 Sea \mathbb{P} un c.p.o. y sea H un subgrupo de $\text{Aut}(\mathbb{P})$. Para cada $\sigma \in V^{\mathbb{P}}$, definimos el *grupo de simetrías* de σ en H como el conjunto

$$\text{Sim}_H(\sigma) = \{h \in H \mid h(\sigma) = \sigma\}.$$

Claramente $\text{Sim}_H(\sigma)$ es un subgrupo de H y para todo conjunto x se cumple que $\text{Sim}_H(\check{x}) = H$. Un argumento formalmente idéntico a la prueba del teorema 6.35 nos da que si $f \in \text{Aut } \mathbb{P}$ entonces $\text{Sim}_H(f(\sigma)) = \text{Sim}_H(\sigma)^f$.

Si \mathcal{F} es un filtro normal de subgrupos de H (definición 6.36), diremos que σ es *simétrico* (respecto a H y \mathcal{F}) si $\text{Sim}_H(\sigma) \in \mathcal{F}$.

Diremos que σ es *hereditariamente simétrico* (respecto de H y \mathcal{F}) si σ es simétrico y todo $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ es hereditariamente simétrico. (Es fácil justificar la validez de esta definición definiendo recurrentemente la función característica de los \mathbb{P} -nombres hereditariamente simétricos.) Llamaremos $SV^{\mathbb{P}}$ a la clase de todos los \mathbb{P} -nombres hereditariamente simétricos.

Una simple inducción prueba que $\bigwedge x \check{x} \in SV^{\mathbb{P}}$.

Si M es un modelo transitivo de ZF y $\mathbb{P} \in M$, llamaremos $SM^{\mathbb{P}} = SV^{\mathbb{P}} \cap M$ a la clase de todos los \mathbb{P} -nombres $\sigma \in M^{\mathbb{P}}$ hereditariamente simétricos M .

Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M definimos la *extensión simétrica*

$$SM[G] = \{\tau_G \mid \tau \in SM^{\mathbb{P}}\}.$$

A los elementos de $SM[G]$, es decir, los elementos de $M[G]$ que admiten un nombre hereditariamente simétrico, los llamaremos *conjuntos simétricos*.

Hemos de probar que las extensiones simétricas son modelos transitivos de ZF. Empezamos probando que los automorfismos de \mathbb{P} permutan los nombres hereditariamente simétricos:

Teorema 6.47 *Sea \mathbb{P} un c.p.o., sea H un subgrupo de $\text{Aut } \mathbb{P}$, sea \mathcal{F} un filtro normal de subgrupos de H y sea $g \in H$. Entonces $g|_{SV^{\mathbb{P}}} : SV^{\mathbb{P}} \rightarrow SV^{\mathbb{P}}$ biyectiva.*

DEMOSTRACIÓN: Veamos que $\bigwedge \sigma \in SV^{\mathbb{P}} g(\sigma) \in SV^{\mathbb{P}}$ por \in -inducción. Lo suponemos cierto para los nombres en la clausura transitiva de σ , con lo que $\mathcal{D}g(\sigma) \subset SV^{\mathbb{P}}$. Por otra parte, $\text{Sim}_H(g(\sigma)) = \text{Sim}_H(\sigma)^g \in \mathcal{F}$, luego $g(\sigma)$ es simétrico y, por consiguiente, hereditariamente simétrico.

Esto prueba que $g|_{SV^{\mathbb{P}}} : SV^{\mathbb{P}} \rightarrow SV^{\mathbb{P}}$. Ciertamente la restricción es inyectiva porque g lo es. Además es suprayectiva, pues si $\sigma \in SV^{\mathbb{P}}$, su antiimagen por g es $g^{-1}(\sigma)$, que está en $SV^{\mathbb{P}}$ por la parte ya probada. ■

En particular, si M es un modelo transitivo de ZFC y $\mathbb{P}, H, \mathcal{F} \in M$ cumplen (en M) las condiciones del teorema anterior y $g \in H$, por la versión relativizada del teorema concluimos que $g|_{SM^{\mathbb{P}}} : SM^{\mathbb{P}} \rightarrow SM^{\mathbb{P}}$ biyectiva.

Teorema 6.48 *Sea M un modelo transitivo de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea $H \in M$ un subgrupo de $\text{Aut}^M \mathbb{P}$ y $\mathcal{F} \in M$ un filtro normal M de subgrupos de H . Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces $M \subset SM[G] \subset M[G]$ y $SM[G]$ es un modelo transitivo de ZF salvo a lo sumo los axiomas de reemplazo y partes.*

DEMOSTRACIÓN: Si $x \in M$ entonces $\check{x} \in SM^{\mathbb{P}}$, luego $x = \check{x}_G \in SM[G]$. la inclusión $SM[G] \subset M[G]$ es obvia.

Si $u \in v \in SM[G]$, entonces $v = \tau_G$ con $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$. Por consiguiente $u = \sigma_G$, con σ en el dominio de τ , luego $\sigma \in SM^{\mathbb{P}}$. Así pues, $u = \sigma_G \in SM[G]$.

Esto prueba que $SM[G]$ es transitivo, con lo que cumple el axioma de extensionalidad. El axioma de regularidad se cumple en cualquier clase.

Veamos el axioma del par. Sean $x, y \in SM[G]$. Entonces $x = \sigma_G, y = \tau_G$, con $\sigma, \tau \in SM^{\mathbb{P}}$. Sea $\rho = \text{pd}(\sigma, \tau) = \{(\sigma, \mathbf{1}), (\tau, \mathbf{1})\}$.

Tenemos que $\text{Sim}_H(\sigma), \text{Sim}_H(\tau) \in \mathcal{F}$ y claramente

$$\text{Sim}_H(\sigma) \cap \text{Sim}_H(\tau) \leq \text{Sim}_H(\rho).$$

Por lo tanto ρ es simétrico. Como su dominio está formado por los nombres hereditariamente simétricos σ y τ , de hecho $\rho \in SM^{\mathbb{P}}$, luego concluimos que $\{x, y\} = \rho_G \in SM[G]$.

Ahora comprobamos el axioma de la unión. Tomemos $x \in SM[G]$, de modo que $x = \sigma_G$ con $\sigma \in SM^{\mathbb{P}}$. En la prueba de 4.34 vimos que

$$\pi = \{(\rho, p) \mid p \in \mathbb{P} \wedge \forall \tau qr((\tau, q) \in \sigma \wedge (\rho, r) \in \tau \wedge p \leq r \wedge p \leq q)\} \in M^{\mathbb{P}}.$$

cumple $\pi_G = \bigcup_{y \in x} y$. Basta probar que $\pi \in SM^{\mathbb{P}}$.

Si $\rho \in \mathcal{D}\pi$, existe $\tau \in \mathcal{D}\sigma$ tal que $\rho \in \mathcal{D}\tau$. Entonces $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$, porque σ es hereditariamente simétrico, luego también $\rho \in SM^{\mathbb{P}}$. Falta probar que π es simétrico, para lo cual basta a su vez comprobar que $\text{Sim}_H(\sigma) \leq \text{Sim}_H(\pi)$.

Si $g \in \text{Sim}_H(\sigma)$, sea $(\rho, p) \in \pi$ y sean τ, q, r tales que

$$(\tau, q) \in \sigma \wedge (\rho, r) \in \tau \wedge p \leq r \wedge p \leq q.$$

Entonces

$$(g(\tau), g(q)) \in g(\sigma) \wedge (g(\rho), g(r)) \in g(\tau) \wedge g(p) \leq g(r) \wedge g(p) \leq g(q),$$

de donde se sigue que $(g(\rho), g(p)) \in \pi$, es decir, $g(\pi) \subset \pi$. Aplicando esto a g^{-1} concluimos que $g^{-1}(\pi) \subset \pi$, luego $\pi \subset g(\pi)$ y tenemos la igualdad. Esto prueba que $g \in \text{Sim}_H(\pi)$.

El axioma de infinitud se sigue de que $\omega \in M \subset SM[G]$. ■

Demostrar que $SM[G]$ satisface los axiomas de reemplazo y partes presenta la misma dificultad que en el caso de $M[G]$, pero afortunadamente el trabajo que ya hemos hecho para el caso de $M[G]$ simplifica el necesario para $SM[G]$:

Definición 6.49 Si \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa, H es un subgrupo de $\text{Aut } \mathbb{B}$ y \mathcal{F} es un filtro normal de subgrupos de H , para cada fórmula $\phi(x_1, \dots, x_n)$ sin descriptores y nombres $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in SV^{\mathbb{B}}$, definimos como sigue el valor booleano simétrico $\|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|_S$:

- a) $\|\sigma = \tau\|_S = \|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|_S = \|\sigma \in \tau\|$.
- b) $\|\neg\phi\|_S \equiv \|\phi'\|'_S$,
- c) $\|\phi \rightarrow \psi\|_S \equiv \|\phi\|_S \rightarrow \|\psi\|_S$,
- d) $\|\bigwedge x \phi\|_S \equiv \bigwedge_{\sigma \in SV^{\mathbb{B}}} \|\phi(\sigma)\|_S$.

Si comparamos con la definición 4.5, hay dos diferencias: La primera se da en el apartado a), pues en 4.5 sólo teníamos definido $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$ para \mathbb{B} -nombres extensionales, mientras que en la definición precedente $\sigma, \tau \in SV^{\mathbb{B}}$ y aprovechamos que ya tenemos definido $\|\sigma = \tau\|$ y $\|\sigma \in \tau\|$ para \mathbb{B} -nombres cualesquiera (definición 4.37). La segunda diferencia se da en el apartado d), donde el ínfimo se toma para \mathbb{B} -nombres no necesariamente extensionales, pero sí hereditariamente simétricos.

Claramente $\|\phi\|_S$ cumple las propiedades análogas e), f), g), h) enunciadas tras la definición 4.5. El teorema 4.12 es trivial para $\|\sigma = \tau\|_S$ y $\|\sigma \in \tau\|_S$,

pues sólo consiste en restringir a nombres hereditariamente simétricos lo que el teorema fundamental afirma para nombres cualesquiera (teniendo en cuenta las observaciones posteriores a 4.37). Ahora la demostración del teorema fundamental 4.13 se adapta mínimamente para probar:

Teorema 6.50 *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula⁸ con a lo sumo las variables libres indicadas. Sea M un modelo transitivo de ZF, sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa^M, sea $H \in M$ un subgrupo de $\text{Aut } \mathbb{B}$, sea $\mathcal{F} \in M$ un filtro normal de subgrupos de H , sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in SM^{\mathbb{B}}$ y sea G un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M . Entonces*

$$\phi^{SM[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \|\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\|_S^M \in G.$$

El paso siguiente es generalizar este teorema a c.p.o.s arbitrarios. Para ello observamos que si \mathbb{P} es un c.p.o., e $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{B} = R(\mathbb{P})$ es su compleción, para cada $f \in \text{Aut } \mathbb{P}$, el teorema [TC 10.22] aplicado a la inmersión densa $f \circ i$ nos da la existencia de un único automorfismo f^* que hace commutativo el diagrama siguiente:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{B} & \xrightarrow{f^*} & \mathbb{B} \\ i \uparrow & & \uparrow i \\ \mathbb{P} & \xrightarrow{f} & \mathbb{P} \end{array}$$

Tenemos así una aplicación $\text{Aut } \mathbb{P} \rightarrow \text{Aut } \mathbb{B}$, y la unicidad de la extensión implica⁹ que $(f \circ g)^* = f^* \circ g^*$. De aquí se sigue fácilmente que si H es un subgrupo de $\text{Aut } \mathbb{P}$ y llamamos $H^* = \{f^* \mid f \in H\}$, entonces H^* es un subgrupo de $\text{Aut } \mathbb{B}$, y si \mathcal{F} es un filtro normal de subgrupos de H y $\mathcal{F}^* = \{G^* \mid G \in \mathcal{F}\}$, entonces \mathcal{F}^* es un filtro normal de subgrupos de H^* .

Más aún, si $\sigma \in V^{\mathbb{P}}$ y $f \in \text{Aut } \mathbb{P}$, tenemos que $f^*(i(\sigma)) = i(f(\sigma))$, de donde se sigue inmediatamente que $\text{Sim}_H(\sigma)^* \subset \text{Sim}_{H^*}(i(\sigma))$, luego $\text{Sim}_H(\sigma) \in \mathcal{F}$ implica que $\text{Sim}_{H^*}(i(\sigma)) \in \mathcal{F}^*$, y de aquí que si $\sigma \in SV^{\mathbb{P}}$, entonces $i(\sigma) \in SV^{\mathbb{B}}$.

Así pues, tenemos que $i : V^{\mathbb{P}} \rightarrow V^{\mathbb{B}}$ se restringe a $i : SV^{\mathbb{P}} \rightarrow SV^{\mathbb{B}}$.

Por otra parte, consideramos la definición de $i^{-1}(\sigma)$ dada justo antes del teorema 4.42 y observamos que si $\sigma \in V^{\mathbb{B}}$ y $f \in \text{Aut } \mathbb{P}$, se cumple

$$f(i^{-1}(\sigma)) = i^{-1}(f^*(\sigma)).$$

En efecto, razonando por \in -inducción, puesto que

$$i^{-1}(\sigma) = \{(\tau, p) \mid \forall q \in \mathbb{B} ((\tau, q) \in \sigma \wedge i(p) \leq q)\},$$

tenemos que

$$f(i^{-1}(\sigma)) = \{(\tau, p) \mid \forall q \in \mathbb{B} ((\tau, q) \in \sigma \wedge i(p) \leq q)\},$$

mientras que

$$i^{-1}(f^*(\sigma)) = \{(\tau, p) \mid \forall q \in \mathbb{B} ((\tau, q) \in f^*(\sigma) \wedge i(p) \leq q)\}.$$

⁸En principio sin descriptores, pero luego eliminaremos esta restricción.

⁹Esto significa que $f \mapsto f^*$ es un homomorfismo de grupos.

Ahora es pura rutina comprobar la doble inclusión.¹⁰

Por consiguiente, $\text{Sim}_{H^*}(\sigma) \subset \text{Sim}_H(i^{-1}(\sigma))^*$, de donde se sigue inmediatamente que si $\sigma \in SV^{\mathbb{P}}$, entonces $i^{-1}(\sigma) \in SV^{\mathbb{P}}$.

En definitiva, tenemos $i : SV^{\mathbb{P}} \longrightarrow SV^{\mathbb{B}}$, $i^{-1} : SV^{\mathbb{B}} \longrightarrow SV^{\mathbb{P}}$. El teorema 4.42 implica ahora trivialmente:

Teorema 6.51 *Sea M un modelo transitivo de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y sea $i : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{B}$ la inmersión en su compleción^M. Sea H un subgrupo de $\text{Aut}^M \mathbb{P}$, sea \mathcal{F} un filtro normal^M de subgrupos de H y consideremos el subgrupo $H^* \subset \text{Aut} \mathbb{B}$ y el filtro \mathcal{F}^* . Sea G^* un ultrafiltro \mathbb{B} -genérico sobre M y sea $G = i^{-1}[G^*]$. Entonces $SM[G] = SM[G^*]$.*

DEMOSTRACIÓN: En efecto, si $x \in SM[G]$ entonces $x = \sigma_G$, con $\sigma \in SM^{\mathbb{P}}$, luego por 4.42 tenemos que $x = i(\sigma)_{G^*}$, y hemos visto que $i(\sigma) \in SM^{\mathbb{B}}$, luego $x \in SM[G^*]$. Igualmente se prueba la otra inclusión. ■

Ahora adaptamos la definición 4.46:

Definición 6.52 Sea \mathbb{P} un c.p.o., sea $i : \mathbb{P} \longrightarrow R(\mathbb{P})$ la inmersión densa en su compleción, sea $p \in \mathbb{P}$ y sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in SV^{\mathbb{P}}$. Definimos

$$p \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \equiv i(p) \leq \|\phi(i(\sigma_1), \dots, i(\sigma_n))\|_S.$$

También podemos definir \Vdash_S^* como en 4.43 cambiando $M[G]$ por $SM[G]$, los análogos de 4.44 y 4.45 b) se demuestran sin dificultad y con ello obtenemos finalmente el teorema fundamental:

Teorema 6.53 *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula con a lo sumo las variables libres indicadas. Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea $H \in M$ un subgrupo de $\text{Aut}^M \mathbb{P}$, sea $\mathcal{F} \in M$ un filtro normal^M de subgrupos de H , y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in SM^{\mathbb{P}}$.*

a) Si $p \in \mathbb{P}$ entonces $(p \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$ si y sólo si para todo filtro \mathbb{P} -genérico sobre M con $p \in G$ se cumple $\phi^{SM[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$.

b) Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M entonces

$$\phi^{SM[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \bigvee p \in G (p \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M.$$

¹⁰En efecto, si $(i^{-1}(f^*(\tau)), f(p)) \in f(i^{-1}(\sigma))$, entonces

$$f^*(q) \in \mathbb{B} \wedge (f^*(\tau), f^*(q)) \in f^*(\sigma) \wedge i(f(p)) = f^*(i(p)) \leq f^*(q),$$

y esto prueba que $(i^{-1}(f^*(\tau)), f(p)) \in i^{-1}(f^*(\sigma))$.

A su vez, si $(i^{-1}(\tau), p) = (i^{-1}(f^*((f^*)^{-1}(\tau))), f(f^{-1}(p))) \in i^{-1}(f^*(\sigma))$, entonces

$$(f^*)^{-1}(q) \in \mathbb{B} \wedge ((f^*)^{-1}(\tau), (f^*)^{-1}(q)) \in \sigma \wedge i(f^{-1}(p)) = (f^*)^{-1}(i(p)) \leq (f^*)^{-1}(q),$$

y esto prueba que $(i^{-1}(\tau), p) \in f(i^{-1}(\sigma))$.

En principio el teorema vale para fórmulas sin descriptores, pero ahora es inmediato que si ϕ y ψ son fórmulas sin descriptores equivalentes en ZF menos reemplazo y partes, entonces $\mathbf{1} \Vdash_S (\phi \leftrightarrow \psi)$ (donde las variables se sustituyen por nombres de $SV^{\mathbb{P}}$), lo que permite definir $p \Vdash_S \phi$ y $\|\phi\|_S$ para fórmulas con descriptores y generalizar los resultados a fórmulas arbitrarias.

Seguidamente demostramos el caso particular de 4.48 que realmente vamos a necesitar:

Teorema 6.54 *Sea \mathbb{P} un c.p.o., sea H un subgrupo de $\text{Aut } \mathbb{P}$, sea \mathcal{F} un filtro normal de subgrupos de H y sea $f \in H$. Si $\phi(x_1, \dots, x_n)$ es una fórmula metamatemática y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in SV^{\mathbb{P}}$, entonces*

$$p \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow f(p) \Vdash_S \phi(f(\sigma_1), \dots, f(\sigma_n)).$$

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema de reflexión basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M . Suponemos, pues, que todos los datos del enunciado están en M y que $(p \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$. Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $f(p) \in G$, entonces por 4.42 sabemos que $f^{-1}[G]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $M[f^{-1}[G]] = M[G]$, y además, para todo $\sigma \in SM^{\mathbb{P}}$, se cumple $\sigma_{f^{-1}[G]} = f(\sigma)_G$. Esto implica que $SM[G] = SM[f^{-1}[G]]$.

Por otra parte, $p \in f^{-1}[G]$, luego $\phi^{SM[f^{-1}[G]]}((\sigma_1)_{f^{-1}[G]}, \dots, (\sigma_n)_{f^{-1}[G]})$, pero esto es lo mismo que $\phi^{SM[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$, luego podemos concluir que $f(p) \Vdash_S \phi(f(\sigma_1), \dots, f(\sigma_n))$. La inclusión contraria se obtiene aplicando la parte ya probada a f^{-1} . ■

Con el teorema siguiente completamos la teoría básica sobre extensiones simétricas:

Teorema 6.55 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea $H \in M$ un subgrupo de $\text{Aut}^M \mathbb{P}$, sea $\mathcal{F} \in M$ un filtro normal M de subgrupos de H y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces $SM[G]$ es un modelo transitivo numerable de ZF.*

DEMOSTRACIÓN: La prueba es análoga a la de 4.49. Sólo hay que comprobar en añadidura que ciertos \mathbb{P} -nombres son hereditariamente simétricos. Para probar el axioma de reemplazo partimos de una fórmula $\phi(x, y, x_1, \dots, x_n)$ y de conjuntos $\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}, \sigma_G \in SM[G]$ como en 4.49. Construimos $S \subset SM^{\mathbb{P}}$ igual que allí pero ahora completamos la construcción como sigue: definimos

$$S'_0 = S \wedge \bigwedge n \in \omega S'_{n+1} = \bigcup_{g \in H} g[S'_n] \wedge S' = \bigcup_{n \in \omega} S'_n.$$

De este modo $S' \in M$ cumple lo mismo que S (porque lo contiene) y además $\bigwedge_{g \in H} g[S'] = S'$. Definimos

$$\rho = \{(\mu, p) \mid \mu \in S' \wedge p \in \mathbb{P} \wedge \bigvee \pi \in \mathcal{D} \sigma p \Vdash_S (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu))\}.$$

Basta comprobar que $\rho \in SM^{\mathbb{P}}$. El resto de la prueba es idéntico a 4.49. Como $S' \subset SM^{\mathbb{P}}$, tenemos que el dominio de ρ está contenido en $SM^{\mathbb{P}}$, luego sólo hemos de ver que ρ es simétrico. Para ello bastará probar que

$$\text{Sim}_H(\sigma_1) \cap \cdots \cap \text{Sim}_H(\sigma_n) \cap \text{Sim}_H(\sigma) \subset \text{Sim}_H(\rho).$$

Tomamos g en el grupo de la izquierda. Si $(\mu, p) \in \rho$, sea $\pi \in \mathcal{D}\sigma$ tal que

$$p \Vdash_S (\pi \in \sigma \wedge \phi(\pi, \mu, \sigma_1, \dots, \sigma_n)).$$

Entonces $g(\pi) \in \mathcal{D}(g(\sigma)) = \mathcal{D}\sigma$, $g(\mu) \in g[S'] = S'$ y por el teorema anterior

$$g(p) \Vdash_S (g(\pi) \in \sigma \wedge \phi(g(\pi), g(\mu), \sigma_1, \dots, \sigma_n)).$$

Esto prueba que $(g(\mu), g(p)) \in \rho$. Por consiguiente $g(\rho) \subset \rho$ y razonando con g^{-1} obtenemos la igualdad.

Para probar el axioma de partes tomamos $\sigma_G \in SM[G]$ y definimos

$$S = \{\mu \in SM^{\mathbb{P}} \mid \mathcal{D}\mu \subset \mathcal{D}\sigma\} \in M, \quad \rho = S \times \{\mathbf{1}\} \in M^{\mathbb{P}}.$$

Es fácil ver que $\text{Sim}_H(\sigma) \subset \text{Sim}_H(\rho)$, de donde se sigue que $\rho \in SM^{\mathbb{P}}$. Siguiendo el argumento de 4.49, tomamos $\tau_G \subset \sigma_G$ y definimos

$$\mu = \{(\pi, p) \mid \pi \in \mathcal{D}\sigma \wedge p \Vdash_S \pi \in \tau\}.$$

Se cumple que $\mu \in SM^{\mathbb{P}}$ porque $\text{Sim}_H(\sigma) \cap \text{Sim}_H(\tau) \subset \text{Sim}_H(\mu)$. Por lo tanto $\mu \in S$ y el argumento de 4.49 vale igualmente. ■

Ahora es claro que si ϕ es un teorema de ZF, entonces $\mathbf{1} \Vdash_S \phi$.

6.5 Ejemplos de extensiones simétricas

En la sección 6.3 considerábamos filtros de subgrupos definidos mediante el concepto de soporte. Vamos a ver que es posible hacer algo análogo con extensiones simétricas:

Definición 6.56 Sea X un conjunto y $\mathbb{P} = \text{Fn}(X \times \omega, 2, \aleph_0)$. Sea H un subgrupo del grupo de permutaciones Σ_X^M . Para cada $g \in H$ definimos $g^* : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{P}$ mediante

$$g^*(p) = \{(g(x), m, r) \mid (x, m, r) \in p\}.$$

Es fácil ver que $g^* \in \text{Aut } \mathbb{P}$, así como que

$$\bigwedge g h \in H \quad (g \circ h)^* = g^* \circ h^* \wedge \bigwedge g \in H \quad (g^{-1})^* = (g^*)^{-1}.$$

Además la identidad en X induce la identidad en \mathbb{P} . Esto se traduce en que $H^* = \{g^* \mid g \in H\}$ es un subgrupo de $\text{Aut } \mathbb{P}$.

Por consiguiente, cada $g \in H$ puede identificarse con el automorfismo g^* de $\text{Aut } \mathbb{P}$ y, por ello, en lo sucesivo escribiremos¹¹ g en lugar de g^* y haremos actuar indistintamente sus elementos sobre elementos de X , condiciones o \mathbb{P} -nombres.

Si $B \subset X$, llamaremos

$$\text{Est}_H(B) = \{h \in H \mid \bigwedge n \in B \ h(n) = n\}.$$

Claramente $\text{Est}_H(B)$ es un subgrupo de H . Definimos el *filtro de los soportes finitos* en H como

$$\mathcal{F} = \{K \mid K \text{ es subgrupo de } H \wedge \bigvee B \in \mathcal{P}X (B \text{ finito} \wedge \text{Est}_H(B) \subset K)\}.$$

Se comprueba fácilmente que \mathcal{F} es un subgrupo normal de subgrupos de H .

Ahora relativizamos todo esto a un modelo transitivo numerable M de ZFC: tomamos $X \in M$, con lo que $\mathbb{P} \in M$. Fijamos un subgrupo $H \subset \text{Aut } \mathbb{P}$ tal que $H \in M$ y consideramos $\mathcal{F}^M \in M$. Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , podemos considerar la extensión simétrica $SM[G]$ determinada por H y \mathcal{F}^M . Sea $f_G : X \times \omega \rightarrow 2$ la función genérica. Para cada $x \in X$ sean

$$s_x = \{n \in \omega \mid f_G(x, n) = 1\} \in M[G],$$

$$\sigma_x = \{(\check{n}, p) \mid p \in \mathbb{P} \wedge (x, n, 1) \in p\} \in M^\mathbb{P}.$$

Claramente $\sigma_{xG} = s_x$ y si $g \in H$ entonces $g(\sigma_x) = \sigma_{g(x)}$. En consecuencia $\text{Est}_H(\{x\}) \subset \text{Sim}_H(\sigma_x)$, por lo que cada σ_x es simétrico, y como los nombres \check{n} son hereditariamente simétricos, concluimos que $\sigma_x \in SM^\mathbb{P}$ y $s_x \in SM[G]$.

A los conjuntos s_x los llamaremos *conjuntos genéricos simétricos* y los nombres σ_x serán los *nombres canónicos de los conjuntos genéricos simétricos*.

Es fácil probar que si $x, y \in A$ cumplen $a \neq b$, entonces el conjunto

$$D_{xy} = \{p \in \mathbb{P} \mid \bigvee n((x, n), (y, n) \in \mathcal{D}p \wedge p(x, n) \neq p(y, n))\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} , de donde se sigue que todo filtro genérico G ha de cortarlo, y esto a su vez implica que $s_x \neq s_y$. Así pues, $\mathbb{1} \Vdash_S \sigma_x \neq \sigma_y$.

El teorema siguiente se corresponde con los primeros apartados de 6.43.

Teorema 6.57 *Si ZFC es consistente, también lo es ZF más la existencia de un conjunto infinito $A \subset \mathcal{P}\omega$ sin subconjuntos infinitos numerables. En particular A no puede ser bien ordenado y, por consiguiente, $\mathcal{P}\omega$ tampoco.*

DEMOSTRACIÓN: Partimos de un modelo transitivo numerable M de ZFC, consideramos $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega \times \omega, 2, \aleph_0)$, $H = \Sigma_\omega^M$, G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y $N = SM[G]$ la extensión simétrica determinada por el filtro de soportes finitos.

Sea $A = \{s_n \mid n \in \omega\}$ el conjunto de los conjuntos genéricos simétricos definido en las consideraciones previas a este teorema. Se cumple que $A \in N$

¹¹Notemos que la aplicación $g \mapsto g^*$ es un isomorfismo de grupos entre H y H^* .

porque tiene por nombre a $\sigma = \{(\sigma_n, \mathbf{1}) \mid n \in \omega\}$ y $\text{Sim}_H(\sigma) = H$ (ya que los automorfismos de H permutan los nombres canónicos σ_n).

Veamos que A cumple lo pedido en el modelo N . Ciertamente $A \subset \mathcal{P}\omega$ y es infinito ^{N} porque ser infinito es absoluto. Ahora hemos de probar que no existe $f : \omega \longrightarrow A$ inyectiva tal que $f \in N$. Si existiera sería $f = \tau_G$, para un cierto $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$. Sea $B \subset \omega$ finito tal que $\text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(\tau)$.

Tomamos $i \in \omega \setminus B$ tal que $s_i \in f[\omega]$ y $n \in \omega$ tal que $f(n) = s_i$. Sea $p \in G$ tal que

$$p \Vdash_S (\tau : \omega \longrightarrow \sigma \text{ inyectiva} \wedge \tau(\check{n}) = \sigma_i).$$

Sea $j \in \omega$ tal que $j \notin B$, $j \neq i$ y que no figure como primera componente de un par en el dominio de p . Sea $g \in H$ la permutación que intercambia i con j y deja fijos a los demás números. Entonces $g \in \text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(\tau)$, luego $g(\tau) = \tau$ y también $g(\sigma) = \sigma$, $g(\check{n}) = \check{n}$ y, según las observaciones previas al teorema, $g(\sigma_i) = \sigma_j$. Por consiguiente

$$g(p) \Vdash_S (\tau : \omega \longrightarrow \sigma \text{ inyectiva} \wedge \tau(\check{n}) = \sigma_j).$$

Además p y $g(p)$ son compatibles, ya que los únicos pares en los que discrepan empiezan por i o j , pero en el dominio de p no hay pares que empiecen por j y en el dominio de $g(p)$ no hay pares que empiecen por i . Sea $r \in \mathbb{P}$ tal que $r \leq p \wedge r \leq g(p)$. Así

$$r \Vdash_S (\tau : \omega \longrightarrow \sigma \text{ inyectiva} \wedge \tau(\check{n}) = \sigma_i \wedge \tau(\check{n}) = \sigma_j).$$

Por consiguiente $r \Vdash_S \sigma_i = \sigma_j$, en contradicción con que $\mathbf{1} \Vdash_S \sigma_i \neq \sigma_j$. ■

Conviene reflexionar sobre la prueba que acabamos de ver. Bajo el supuesto de que A tiene un subconjunto numerable determinamos un σ_i mediante una propiedad que lo caracteriza en términos de nombres τ y \check{n} ; fijamos una condición p que fuerce esta propiedad y construimos un automorfismo g que mantenga los parámetros \check{n} y τ , pero transforme σ_i en un σ_j . El punto más delicado es que p y $g(p)$ han de resultar compatibles, pues entonces una extensión común fuerza que σ_i y σ_j cumplan una misma propiedad que supuestamente caracteriza a un único conjunto genérico, y así tenemos la contradicción. Garantizar la compatibilidad de p y $g(p)$ nos ha obligado a elegir j después de haber fijado p . Si el lector intenta demostrar los apartados siguientes del teorema 6.43 se encontrará con que necesitaría permutar dos nombres σ_i y σ_j elegidos antes de determinar la condición p , y no después, pero entonces ya no es posible garantizar la compatibilidad de p y $g(p)$, y el argumento se viene abajo. Esto no es casual. De hecho $\mathcal{P}\omega$ (y en particular A), sí que puede ser totalmente ordenado en N (puede biyectarse con el conjunto de los números reales sin necesidad del axioma de elección, y el orden total de \mathbb{R} se traslada así a $\mathcal{P}\omega$).

La conclusión es que para adaptar las pruebas de consistencia en ZFA no podemos en general sustituir los átomos por subconjuntos de ω . A continuación veremos que todo funciona bien si usamos subconjuntos de subconjuntos de ω . Como el resto de 6.43 es un poco más complejo, veremos primero la versión del teorema 6.44.

Teorema 6.58 *Si ZFC es consistente, también lo es ZF más la existencia de una familia numerable de pares desordenados que no tiene funciones de elección.*

DEMOSTRACIÓN: Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(2 \times \omega \times \omega \times \omega, 2, \aleph_0)$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y consideremos la función genérica $f_G : 2 \times \omega \times \omega \times \omega \rightarrow 2$. Sean

$$\begin{aligned} a_{nm} &= \{i \in \omega \mid f_G(0, n, m, i) = 1\} \in M[G], \\ b_{nm} &= \{i \in \omega \mid f_G(1, n, m, i) = 1\} \in M[G], \\ a_n &= \{a_{nm} \mid m \in \omega\} \in M[G], \\ b_n &= \{b_{nm} \mid m \in \omega\} \in M[G], \\ P_n &= \{a_n, b_n\} \in M[G], \\ P &= \{P_n \mid n \in \omega\} \in M[G], \\ \sigma_{nm} &= \{(\check{i}, p) \mid i \in \omega \wedge p \in \mathbb{P} \wedge (0, n, m, i, 1) \in p\} \in M^{\mathbb{P}}, \\ \tau_{nm} &= \{(\check{i}, p) \mid i \in \omega \wedge p \in \mathbb{P} \wedge (1, n, m, i, 1) \in p\} \in M^{\mathbb{P}}, \\ \sigma_n &= \{(\sigma_{nm}, \mathbb{1}) \mid m \in \omega\} \in M^{\mathbb{P}}, \\ \tau_n &= \{(\tau_{nm}, \mathbb{1}) \mid m \in \omega\} \in M^{\mathbb{P}}, \\ \rho_n &= \{(\sigma_n, \mathbb{1}), (\tau_n, \mathbb{1})\} \in M^{\mathbb{P}}, \\ \rho &= \{(\rho_n, \mathbb{1}) \mid n \in \omega\} \in M^{\mathbb{P}}. \end{aligned}$$

Notemos que los conjuntos a_{nm} y b_{nm} son los conjuntos genéricos simétricos (con la notación de la definición general, estamos tomando $X = 2 \times \omega \times \omega$) y σ_{nm} , τ_{nm} son sus nombres canónicos. Así pues, $\sigma_{nmG} = a_{nm}$, $\tau_{nmG} = b_{nm}$. Así mismo es claro que $\sigma_{nG} = a_n$, $\tau_{nG} = b_n$, $\rho_{nG} = P_n$ y $\rho_G = P$.

Definimos ahora H como el conjunto de todas las permutaciones $g \in \Sigma_{2 \times \omega \times \omega}^M$ tales que existen $g_1 : 2 \times \omega \rightarrow 2$ y $g_3 : 2 \times \omega \times \omega \rightarrow \omega$ de modo que

$$g(a, n, m) = (g_1(a), n, g_3(a, n, m)).$$

Se comprueba fácilmente que $H \in M$ y que es un subgrupo de $\Sigma_{2 \times \omega \times \omega}^M$. La definición de H puede parecer compleja a primera vista, pero responde a una idea muy concreta que entenderemos tan pronto como pensemos en la forma en que actúa sobre los conjuntos que hemos definido.

Sea $g \in H$ con $g(0, n, m) = (r_0, n, m_0)$, $g(1, n, m) = (r_1, n, m_1)$. Notemos que $r_0 \neq r_1$, o si no g no sería suprayectiva. Es fácil ver que

$$\begin{aligned} g(\sigma_{nm}) &= \begin{cases} \sigma_{nm0} & \text{si } r_0 = 0, \\ \tau_{nm0} & \text{si } r_0 = 1, \end{cases} & g(\tau_{nm}) &= \begin{cases} \tau_{nm1} & \text{si } r_1 = 1, \\ \sigma_{nm1} & \text{si } r_1 = 0, \end{cases} \\ g(\sigma_n) &= \begin{cases} \sigma_n & \text{si } r_0 = 0, \\ \tau_n & \text{si } r_0 = 1, \end{cases} & g(\tau_n) &= \begin{cases} \tau_n & \text{si } r_1 = 1, \\ \sigma_n & \text{si } r_1 = 0, \end{cases} \end{aligned}$$

Por consiguiente $g(\rho_n) = \rho_n$ y $g(\rho) = \rho$.

Si el lector comprueba estos hechos entenderá la definición de H : al exigir que n permanezca inalterada estamos exigiendo que cada σ_{nm} se transforme

en un $\sigma_{nm'}$ o en un $\tau_{nm'}$, y al exigir que la primera componente de la imagen dependa sólo de a y de n estamos exigiendo que si un σ_{nm_0} se transforma en un $\sigma_{nm'}$, entonces lo mismo valga para todos los σ_{nm} , de modo que g permuta los elementos de σ_n , mientras que si un σ_{nm_0} se transforma en un $\tau_{nm'}$, entonces g transforma σ_n en τ_n .

Llámemos $N = SM[G]$ a la extensión simétrica determinada por el filtro de soportes finitos. Todos los nombres que hemos definido son hereditariamente simétricos, lo cual se deduce inmediatamente de los hechos siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Est}_H(\{(0, n, m)\}) &\subset \text{Sim}_H(\sigma_{nm}), & \text{Est}_H(\{(1, n, m)\}) &\subset \text{Sim}_H(\tau_{nm}), \\ \text{Est}_H(\{(0, n, 0)\}) &\subset \text{Sim}_H(\sigma_n), & \text{Est}_H(\{(1, n, 0)\}) &\subset \text{Sim}_H(\tau_n), \\ \text{Sim}_H(\rho_n) &= \text{Sim}_H(\rho) = H. \end{aligned}$$

Como consecuencia, $P \in N$. Para ver que P es numerable ^{N} basta tener en cuenta que

$$\mu = \{(\text{po}(\check{n}, \rho_n), \mathbb{1}) \mid n \in \omega\} \in SM^{\mathbb{P}}$$

y así $\mu_G = \{P_n\}_{n \in \omega} \in N$. Vamos a ver que P no tiene una función de elección en N o, equivalentemente, que no existe una función $f \in N$ tal que f sea una función de dominio ω y $\bigwedge_{n \in \omega} f(n) \in P_n$.

Si existiera tal f , sería $f = \pi_G$, con $\pi \in SM^{\mathbb{P}}$. Sea $B \subset 2 \times \omega \times \omega$ tal que $\text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(\pi)$. Tomemos un $n \in \omega$ que no figure entre las segundas componentes de las ternas de B . Supongamos por ejemplo que $f(n) = a_n$. Sea $p \in G$ tal que

$$p \Vdash_S (\pi \text{ es una función de dominio } \omega \wedge \pi(\check{n}) = \sigma_n).$$

Ahora vamos a permutar σ_n con τ_n para llegar a una contradicción. Sea $r \in \omega$ tal que si $m \geq r$ entonces r no esté entre las tercera componentes de las ternas del dominio de p . Definimos $g : 2 \times \omega \times \omega \rightarrow 2 \times \omega \times \omega$ la aplicación dada por

$$\begin{aligned} g(a, n', m) &= (a, n', m) && \text{si } n' \neq n, \\ g(0, n, m) &= \begin{cases} (1, n, m + r) & \text{si } m < r, \\ (1, n, m - r) & \text{si } r \leq m < 2r, \\ (1, n, m) & \text{si } 2r \leq m, \end{cases} \\ g(1, n, m) &= \begin{cases} (0, n, m + r) & \text{si } m < r, \\ (0, n, m - r) & \text{si } r \leq m < 2r, \\ (0, n, m) & \text{si } 2r \leq m. \end{cases} \end{aligned}$$

La idea es la siguiente: queremos transformar las ternas que empiezan por $(0, n)$ en las que empiezan por $(1, n)$ y viceversa. Si sólo tocamos este tipo de ternas dejamos fijos los elementos de B , pues ninguna de ellas está en B por la elección de n . Pero también queremos que al permutar las ternas mediante g , las condiciones p y $g(p)$ resulten compatibles. Para ello establecemos que todas las ternas de la forma $(0, n, m)$ con $m \leq r$ (entre las cuales se encuentran todas

las del dominio de p) sean enviadas a ternas $(1, n, m')$ con $m' \geq r$ (ninguna de las cuales está en el dominio de p). Así ninguna terna del dominio de $g(p)$ con segunda componente n aparece en el domino de p , con lo que p y $g(p)$ no pueden contradecirse.

Es fácil ver que $g \in H$ y que de hecho $g \in \text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(\pi)$, de donde $g(\pi) = \pi$, y por otra parte $g(\sigma_n) = \tau_n$. Por consiguiente

$$g(p) \Vdash_S (\pi \text{ es una función de dominio } \omega \wedge \pi(\check{n}) = \tau_n),$$

luego una extensión común de p y $g(p)$ fuerza que $\sigma_n = \tau_n$, lo cual es imposible. ■

Nota En las condiciones del teorema anterior, tenemos que $\bigcup P$ es un conjunto que no puede ser totalmente ordenado, pues un orden total permitiría definir una función de elección en P . Así pues, sin el axioma de elección no puede probarse que todo conjunto puede ser totalmente ordenado. ■

Recordemos que un conjunto es *Dedekind-infinito* o, simplemente, *D-infinito* si existe $f : x \rightarrow x$ inyectiva y no suprayectiva o, equivalentemente, si se puede biyectar con un subconjunto propio. En caso contrario es *D-finito*. Es fácil ver también que un conjunto es *D-infinito* si y sólo si tiene un subconjunto numerable (véase la nota tras [TC 4.38]).

En ZFC, los conjuntos *D-finitos* y *D-infinitos* coinciden respectivamente con los conjuntos finitos e infinitos, pero en ZF esto no es necesariamente cierto, como ya mostraba el teorema 6.43 en ausencia del axioma de regularidad, o como muestra su traducción a extensiones simétricas sin excluir este axioma:

Teorema 6.59 *Si ZFC es consistente también lo es ZF más la existencia de un conjunto $A \subset \mathcal{PP}\omega$ de cardinal \mathfrak{p} tal que*

- a) *A es infinito, pero todos sus subconjuntos son finitos o cofinitos (es decir, de complementario finito).*
- b) *A no tiene subconjuntos (infinitos) numerables (o sea, es D-finito).*
- c) *A no puede ser totalmente ordenado.*
- d) *Los cardinales menores que \mathfrak{p} son exactamente:*

$$0 < 1 < 2 < 3 < 4 \cdots \quad \cdots < \mathfrak{p} - 4 < \mathfrak{p} - 3 < \mathfrak{p} - 2 < \mathfrak{p} - 1,$$

con lo que la clase \mathfrak{C} no está ni totalmente ordenada ni bien fundada.

- e) *Se cumple*

$$\mathfrak{p} < \mathfrak{p} + 1 < \mathfrak{p} + 2 < \cdots < \mathfrak{p} + \mathfrak{p} < \mathfrak{p}^2 < \mathfrak{p}^3 < \cdots$$

- f) *No se cumple $\mathfrak{p}^2 \leq 2^\mathfrak{p}$.*

DEMOSTRACIÓN: partimos de un modelo transitivo numerable M de ZFC y consideramos el c.p.o. $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega \times \omega \times \omega, 2, \aleph_0)$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sean $s_{nm}, s_n, A, \sigma_{nm}, \sigma_n$ y σ como en el teorema anterior (omitiendo las primeras componentes 0/1). Tomamos como H el grupo de las permutaciones $g : \omega \times \omega \rightarrow \omega \times \omega$ tales que existen $h_1 : \omega \rightarrow \omega$ biyectiva y $h_2 : \omega \times \omega \rightarrow \omega$ de modo que $g(n, m) = (h_1(n), h_2(n, m))$.

Esta construcción nos garantiza que si $g \in H$ y $g(n, m) = (r, s)$, entonces $g(\sigma_{nm}) = \sigma_{rs}$, $g(\sigma_n) = \sigma_r$ y $g(\sigma) = \sigma$.

Consideramos la extensión simétrica $N = SM[G]$ determinada por H y el filtro de soportes finitos. Las observaciones anteriores nos dan que todos los nombres que hemos construido son hereditariamente simétricos y por lo tanto $A \in N$.

Si existiera $x \in N$, $x \subset A$ que no fuera finito ni cofinito, entonces $x = \tau_G$ para cierto $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$. Sea $B \subset \omega \times \omega$ finito tal que $\text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(\tau)$. Tomemos $i, j \in \omega \setminus B$ tales que $s_i \in x \wedge s_j \notin x$. Sea $p \in G$ tal que $p \Vdash_S \sigma_i \in \tau \wedge \sigma_j \notin \tau$.

Sea $r \in \omega$ tal que si $m \geq r$ entonces m no aparece como segunda componente de ninguna terna del dominio de p . Como en el teorema anterior definimos $g \in H$ tal que $g(n, m) = (n, m)$ para $i \neq n \neq j$, $g(\sigma_i) = \sigma_j$ y $\neg g(p) \perp p$.

De este modo $g(p) \Vdash_S \sigma_j \in \tau \wedge \sigma_i \notin \tau$, y una extensión común de p y $g(p)$ fuerza una contradicción.

Esto prueba a). Los apartados b) y c) son consecuencias de a) (ver 6.43).

d) La prueba del apartado correspondiente en 6.43 se basa únicamente en los apartados anteriores, luego es válida igualmente en nuestro contexto.

e) Dejamos al lector la adaptación del apartado correspondiente de 6.43.

f) Supongamos que existe una aplicación $f : A \times A \rightarrow \mathcal{P}A \cap N$ inyectiva tal que $f \in N$. Entonces $f = \tau_G$ con $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$. Sea $B \subset \omega \times \omega$ tal que $\text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(\tau)$. Sean $i, j \in \omega$ dos números naturales distintos que no figuren como primera componente de ningún par de B . Tomemos $x = f(s_i, s_j)$ o bien $x = A \setminus f(s_i, s_j)$ de modo que x sea finito (por a).

Digamos que $x = \{s_{i_1}, \dots, s_{i_n}\}$ y sea $\rho = \{(\sigma_{i_1}, \mathbf{1}), \dots, (\sigma_{i_n}, \mathbf{1})\}$. Es inmediato comprobar que $\rho \in SM^{\mathbb{P}}$ y $x = \rho_G$. Sea $p \in G$ tal que

$$p \Vdash_S \tau : \sigma \times \sigma \rightarrow \mathcal{P}\sigma \text{ inyectiva} \wedge \tau(\sigma_i, \sigma_j) = \rho,$$

(o bien $\sigma \setminus \tau(\sigma_i, \sigma_j) = \rho$) según hayamos elegido x .

Si s_i y s_j están ambos o ninguno en x permutaremos i con j , mientras que si, por ejemplo, $s_i \in x \wedge s_j \notin x$, tomaremos $k \in \omega$ que no esté entre las primeras componentes de los pares de B y que sea distinto de i, j, i_1, \dots, i_n . En este caso permutaremos j y k .

Jugando con las segundas componentes podemos construir $g \in \text{Est}_H(B)$ que deje invariantes a todos los σ_r excepto a los dos que queremos permutar y de modo que $\neg p \perp g(p)$. Como es habitual, una extensión común de ambas condiciones fuerza una contradicción. ■

Los conjuntos D-finitos son una rica fuente de anomalías. Notemos ante todo que la existencia de un subconjunto infinito D-finito de $\mathcal{P}\omega$ implica fácilmente la

existencia de un subconjunto análogo del conjunto de los números reales (porque \mathbb{P}_ω puede biyectarse con \mathbb{R} en ZF).

Ejercicio: Probar que es consistente con ZF la existencia de un subconjunto acotado del conjunto \mathbb{R} de los números reales (no vacío) que no contenga ninguna sucesión convergente a su supremo. (Ayuda: considerar un subconjunto infinito D-finito del intervalo $]0, 1[$. Puede tomarse sin máximo elemento.)

Teorema 6.60 *Sea A un conjunto infinito D-finito.*

- a) *El conjunto $S = \{s \in A^{<\omega} \mid s \text{ es inyectiva}\}$ es infinito y D-finito.*
- b) *El conjunto $T = S \setminus \{\emptyset\}$ tiene cardinal menor estrictamente que S pero existe $f : T \rightarrow S$ suprayectiva.*

DEMOSTRACIÓN: a) Si existiera un subconjunto numerable $\{s_n\}_{n \in \omega} \subset S$, podemos tomarlo con $s_0 \neq \emptyset$. Definimos $a_0 = s_0(0)$ y, definido $a_n \in A$, sea k el mínimo natural tal que s_k toma un valor distinto de a_0, \dots, a_n (existe porque hay un número finito de elementos de $A^{<\omega}$ que toman valores en $\{a_0, \dots, a_n\}$). Sea l el mínimo natural tal que $s_k(l) \notin \{a_0, \dots, a_n\}$. Definimos $a_{n+1} = s_k(l)$. De este modo obtenemos un subconjunto numerable de A , contradicción.

b) Por definición de D-finitud, T no puede ser equipotente a S , luego su cardinal es estrictamente menor. Sin embargo, a cada sucesión $s \in T$, digamos $s : n \rightarrow A$, podemos signarle $f(s) = s|_{n-1} \in S$ y claramente f es suprayectiva. ■

Ejercicio: Probar que si existe un conjunto infinito D-finito entonces existe un conjunto de cardinales R semejante en orden al conjunto de los números reales. (Ayuda: Considerar una biyección entre ω y el conjunto \mathbb{Q} de los números racionales. Para cada número real r sea D_r el conjunto de los números naturales cuya imagen es menor que r . Así $r \leq s \leftrightarrow D_r \subset D_s$. Sea S según el teorema anterior y $S_r = \{s \in S \mid |s| \in D_r\}$, claramente D-finito. El conjunto R de los cardinales de los conjuntos S_r cumple lo pedido.)

Probamos ahora un teorema muy general sobre las posibilidades de ordenación de los cardinales en ausencia del axioma de elección:

Teorema 6.61 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y consideremos un conjunto parcialmente ordenado $(D, \leq) \in M$. Existe una extensión simétrica N de M en la cual existe un conjunto $\{\mathfrak{p}_d\}_{d \in D}$ de cardinales^N de modo que $\bigwedge_{d \in D} (d \leq e \leftrightarrow \mathfrak{p}_d \leq \mathfrak{p}_e)$.*

DEMOSTRACIÓN: Tomamos $\mathbb{P} = \text{Fn}(D \times \omega \times \omega \times \omega, 2, \aleph_0)$ y como H el conjunto de las biyecciones $g : D \times \omega \times \omega \rightarrow D \times \omega \times \omega$, $g \in M$, de la forma

$$g(d, n, m) = (d, g_2(d, n), g_3(d, n, m)).$$

Claramente $H \in M$ es un subgrupo de $\Sigma_{D \times \omega \times \omega}^M$ que podemos identificar de la forma usual con un grupo de automorfismos de \mathbb{P} . Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico

sobre M y $N = SM[G]$ la extensión simétrica determinada por el filtro de soportes finitos. Consideramos los conjuntos simétricos s_{dnm} y a partir de ellos formamos los conjuntos $s_{dn} = \{s_{dnm} \mid m \in \omega\} \in M[G]$. Sea $J = (\mathcal{P}D)^M$. Para cada $j \in J$ definimos $s_j = \{s_{dn} \mid d \in j \wedge n \in \omega\} \in M[G]$. Finalmente tomamos $S = \{s_j \mid j \in J\} \in M[G]$.

De forma natural se definen los nombres σ_{dmn} , σ_{dn} , σ_j y σ que nombran respectivamente a s_{dnm} , s_{dn} , s_j y S .

Es claro que si $g \in H$ cumple $g(d, n, m) = (d, n', m')$, entonces tenemos que $g(\sigma_{dnm}) = \sigma_{dn'm'}$, $g(\sigma_{dn}) = \sigma_{dn'}$, $g(\sigma_j) = \sigma_j$ y $g(\sigma) = \sigma$. De aquí se sigue que todos los nombres considerados son hereditariamente simétricos y que todos los conjuntos que hemos construido están en N . También es fácil comprobar que $\mathbb{1}$ fuerza que todos son distintos entre sí. Más aún, $\rho = \{(po(j, \sigma_j), \mathbb{1}) \mid j \in J\}$ también es hereditariamente simétrico, de donde $\{s_j\}_{j \in J} \in N$.

Para cada $d \in D$ sea $j_d = \{e \in D \mid e \leq d\}$ y sea \mathbf{p}_d el cardinal (en N) de s_{j_d} . Claramente $\{\mathbf{p}_d\}_{d \in D} \in N$. Si $d \leq e$ entonces $j_d \subset j_e$, luego $s_{j_d} \subset s_{j_e}$, luego $(\mathbf{p}_d \leq \mathbf{p}_e)^N$. Recíprocamente, si $d \not\leq e$, entonces $j_d \not\subset j_e$. Si demostramos que $(\mathbf{p}_d \not\leq \mathbf{p}_e)^N$ el teorema estará probado. En caso contrario existe $f \in N$ tal que $f : s_{j_d} \longrightarrow s_{j_e}$ inyectiva. Digamos $f = \mu_G$, para un cierto $\mu \in SM^{\mathbb{P}}$. Sea $B \subset D \times \omega \times \omega$ finito tal que $\text{Est}_H(B) \subset \text{Sim}_H(\mu)$. Sean $n_1, n_2 \in \omega$ tales que no aparezcan como segundas componentes de ninguna terna de B . Tenemos que $s_{dn_1} \in s_{j_d}$, luego $f(s_{dn_1}) \in s_{j_e}$ será de la forma $f(s_{dn_1}) = s_{d'k}$, con $d' \leq e$, luego en particular $d' \neq d$. Sea $p \in \mathbb{P}$ tal que

$$p \Vdash_S (\mu : \sigma_{j_d} \longrightarrow \sigma_{j_e} \text{ inyectiva} \wedge \sigma_{dn_1} \in \sigma_{j_d} \wedge \mu(\sigma_{dn_1}) = \sigma_{d'k}).$$

Sea $r \in \omega$ mayor que todas las tercera componentes de las ternas del dominio de p . Definimos $g : D \times \omega \times \omega \longrightarrow D \times \omega \times \omega$ mediante

$$\begin{aligned} g(a, n, m) &= (a, n, m) \text{ si } (n \neq n_1 \wedge n \neq n_2) \vee a \neq d, \\ g(d, n_1, m) &= (d, n_2, s), \\ g(d, n_2, m) &= d(n_1, s), \text{ donde} \end{aligned}$$

$$s = \begin{cases} m + r & \text{si } m < r, \\ m - r & \text{si } r \leq m < 2r, \\ m & \text{si } 2r \leq m. \end{cases}$$

Así $g(\mu) = \mu$, $g(\sigma_{j_d} = \sigma_{j_d})$, $g(\sigma_{j_e} = \sigma_{j_e})$, $g(\sigma_{dn_1}) = \sigma_{dn_2}$, $g(\sigma_{dn_2}) = \sigma_{dn_1}$, $g(\sigma_{d'k}) = \sigma_{d'k}$ y las condiciones p y $g(p)$ son compatibles. Así, una extensión común a ambas fuerza que

$$\mu : \sigma_{j_d} \longrightarrow \sigma_{j_e} \text{ inyectiva} \wedge \sigma_{dn_1}, \sigma_{dn_2} \in \sigma_{j_d} \wedge \mu(\sigma_{dn_1}) = \sigma_{d'k} = \mu(\sigma_{dn_2}),$$

en particular, que $\sigma_{dn_1} = \sigma_{dn_2}$, cuando $\mathbb{1}$ fuerza lo contrario. ■

El teorema 6.58 implica que (sin AE) una unión numerable de conjuntos numerables no tiene por qué ser numerable. El teorema siguiente va más allá:

Teorema 6.62 *Si ZFC es consistente, también lo es ZF+ \aleph_1 es singular + $\mathcal{P}\omega$ es unión numerable de conjuntos numerables.*

DEMOSTRACIÓN: La idea de esta prueba es muy diferente a la de las anteriores. Vamos a colapsar todos los cardinales no numerables menores que \aleph_ω de modo que \aleph_ω se convierta en \aleph_1 .

Sea M un modelo transitivo numerable de $ZFC+V=L$. Tomamos

$$\begin{aligned} \mathbb{P} = & \{p \mid p \subset \omega \times \omega \times \omega_\omega \wedge p \text{ es una función} \wedge p \text{ es finito} \\ & \wedge \bigwedge ni \in \omega ((n, i) \in \mathcal{D}p \rightarrow p(n, i) \in \omega_n)\}^M, \end{aligned}$$

ordenado por la inversa de la inclusión.

Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sea $f_G = \bigcup_{p \in G} p \in M[G]$ la función genérica. Considerando los conjuntos densos oportunos se comprueba sin dificultad que $f_G : \omega \times \omega \rightarrow \omega_\omega^M$ así como que las aplicaciones $f_n : \omega \rightarrow \omega_\omega^M$ dadas por $f_n(i) = f(n, i)$ son en realidad aplicaciones $f_n : \omega \rightarrow \omega_n^M$ suprayectivas, y obviamente $f_n \in M[G]$.

Es claro que f_G colapsa a \aleph_ω^M en $M[G]$, pero vamos a construir una extensión simétrica en la que esto no sucede. Tomamos como H el conjunto de las aplicaciones $g : \omega \times \omega \rightarrow \omega \times \omega$ biyectivas, $g \in M$, de la forma $g(n, i) = (n, g_2(n, i))$. Así $H \in M$ es un grupo de permutaciones de $\omega \times \omega$. Para cada $g \in H$ sea $g^* : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{P}$ dada por $g^*(p) = \{(g(n, i), \alpha) \mid (n, i, \alpha) \in p\}$. Aunque no estamos exactamente en la misma situación que en los teoremas anteriores, es fácil ver que la correspondencia $g \mapsto g^*$ permite identificar a H con un grupo de automorfismos de \mathbb{P} .

Para cada $n \in \omega$ sea $H_n = \{g \in H \mid \bigwedge ki \in \omega (k \leq n \rightarrow g(k, i) = (k, i))\}$. Es fácil ver que $\{H_n\}_{n \in \omega} \in M$ y es una familia de subgrupos de H , por lo que

$$\mathcal{F} = \{L \in M \mid L \text{ es subgrupo de } H \wedge \bigvee n \in \omega H_n \subset L\} \in M,$$

y se comprueba así mismo que \mathcal{F} es un filtro normal M de subgrupos de H . Sea $N = SM[G]$ la extensión simétrica determinada por H y \mathcal{F} . Definimos

$$\sigma_n = \{(\text{po}(\check{i}, \check{\alpha}), p) \mid i \in \omega \wedge \alpha \in \omega_n^M \wedge p \in \mathbb{P} \wedge (n, i, \alpha) \in p\}.$$

Así $H_n \subset \text{Sim}_H(\sigma_n)$, luego $\sigma_n \in SM^\mathbb{P}$ y $f_n = \sigma_{nG} \in N$. Por consiguiente ω_n^M es numerable N (notemos que la existencia en N de $f_n : \omega \rightarrow \omega_n^M$ suprayectiva implica —sin el axioma de elección— que ω_n^M es numerable porque ω está bien ordenado).

De este modo, los cardinales \aleph_n^M se siguen colapsando en N . Ahora probaremos que \aleph_ω^M no se colapsa. Si $p \in \mathbb{P}$ y $n \in \omega$, llamaremos $p|_n = p|_{n \times \omega}$. Necesitaremos el resultado siguiente:

(*) *Si $\phi(x_1, \dots, x_n)$ es una fórmula, $\sigma_1, \dots, \sigma_m \in SM^\mathbb{P}$ cumplen que*

$$H_n \subset \text{Sim}_H(\sigma_1) \cap \dots \cap \text{Sim}_H(\sigma_m)$$

y $p \in \mathbb{P}$ cumple $p \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_m)$, entonces $p|_{n+1} \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_m)$.

En efecto, en caso contrario existiría una condición $q \leq p|_{n+1}$ tal que

$$q \Vdash_S \neg \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_m).$$

Sea $r \in \omega$ mayor que todas las segundas componentes de los pares del dominio de q . Definimos $g : \omega \times \omega \rightarrow \omega \times \omega$ mediante

$$g(m, i) = \begin{cases} (m, i) & \text{si } m \leq n \vee 2r \leq i, \\ (m, i+r) & \text{si } n < m \wedge i < r, \\ (m, i-r) & \text{si } n < m \wedge r \leq i < 2r. \end{cases}$$

Así $g \in H_n$ y $g(p)$ es compatible con q . Por hipótesis $g(\sigma_i) = \sigma_i$ para $i = 1, \dots, m$ y, por lo tanto $g(p) \Vdash_S \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$. Pero entonces una extensión común de q y $g(p)$ fuerza $\phi \wedge \neg\phi$, contradicción.

$f \in N$ tal que $f : \omega \rightarrow \omega_\omega^M$ suprayectiva, sería $f = \tau_G$, con $\tau \in SM^\mathbb{P}$. Sea $p_0 \in G$ tal que $p_0 \Vdash_S \tau : \omega \rightarrow \omega_\omega^M$ suprayectiva. Sea $n \in \omega$ suficientemente grande como para que $H_n \subset \text{Sim}_H(\tau)$ y $p_0|_{n+1} = p_0$.

Si $\alpha \in \omega_\omega^M$, existe un $m \in \omega$ tal que $f(m) = \alpha$, luego existe un $p \in G$, $p \leq p_0$ tal que $p \Vdash_S \tau(\check{m}) = \check{\alpha}$. Por lo tanto

$$\omega_\omega^M = \bigcup_{m \in \omega} \{\alpha \in \omega_\omega^M \mid \forall p \in \mathbb{P} (p \leq p_0 \wedge p \Vdash_S \tau(\check{m}) = \check{\alpha})\}.$$

La familia de conjuntos de la derecha está en M , luego ha de existir un $m \in \omega$ tal que el conjunto $A = \{\alpha \in \omega_\omega^M \mid \forall p \in \mathbb{P} (p \leq p_0 \wedge p \Vdash_S \tau(\check{m}) = \check{\alpha})\}$ cumpla $|A|^M > \aleph_{n+1}^M$.

Usando el axioma de elección M , obtenemos una familia de condiciones $\{p_\alpha\}_{\alpha \in A} \in M$ tal que para todo $\alpha \in A$ se cumpla $p_\alpha \leq p_0 \wedge p_\alpha \Vdash_S \tau(\check{m}) = \check{\alpha}$. Por (*) se cumple, de hecho, que $p_\alpha|_{n+1} \Vdash_S \tau(\check{m}) = \check{\alpha}$. Equivalentemente, podemos suponer que $p_\alpha \subset (n+1) \times \omega \times \omega_\omega^M$.

Se cumple que si $\alpha, \beta \in A$ son distintos, entonces $p_\alpha \perp p_\beta$, pues fuerzan fórmulas contradictorias. Por lo tanto, el conjunto $W = \{p_\alpha \mid \alpha \in A\} \in M$ cumple $|W|^M > \aleph_{n+1}^M$, cuando por otra parte sus elementos son aplicaciones de $\omega \times \omega$ en ω_n , y por consiguiente $|W|^M \leq (\aleph_n^{\aleph_0})^M = \aleph_{n+1}^M$, ya que estamos suponiendo que M cumple la HCG.

Esta contradicción prueba que \aleph_ω^M no es numerable en N , luego $\aleph_\omega^M = \aleph_1^N$.

Cualquier aplicación cofinal $f : \omega \rightarrow \aleph_\omega^M$ tal que $f \in M$ está también en N y sigue siendo cofinal, pues esto es absoluto. Esto prueba que ($\text{cf } \aleph_1 = \aleph_0$) N .

Nos ocupamos ahora de $\mathcal{P}\omega$. Dado $n \in \omega$, llamamos ρ_n al conjunto de todos los pares $(\sigma, \mathbf{1})$, donde $\sigma \in SM^\mathbb{P}$ contiene únicamente pares de la forma (i, p) , con $i \in \omega$ y $p \in \mathbb{P}$ y las primeras componentes de los pares del dominio de p son menores o iguales que n . Obviamente ρ_n es un \mathbb{P} -nombre y cada $g \in H$ permute a sus elementos, luego $\text{Sim}_H(\rho_n) = H$. Por consiguiente $\rho_n \in SM^\mathbb{P}$. Sea $A_n = \rho_{nG} \in N$. Es claro que $A_n \subset \mathcal{P}\omega$. Sea $\rho = \{(\rho_n, \mathbf{1}) \mid n \in \omega\} \in M^\mathbb{P}$. También $\text{Sim}_H(\rho) = H$, con lo que $\rho \in SM^\mathbb{P}$ y $A = \{A_n \mid n \in \omega\} = \rho_G \in N$. Más aún, se cumple que $\mu = \{(\rho(\check{n}, \rho_n), \mathbf{1}) \mid n \in \omega\} \in SM^\mathbb{P}$, por lo que $\{A_n\}_{n \in \omega} = \mu_G \in N$. En particular A es numerable N .

Si llamamos B al conjunto de las condiciones de \mathbb{P} en cuyo dominio sólo haya pares con primera componente $\leq n$, tenemos que $|B|^M \leq (\aleph_n^{\aleph_0})^M = \aleph_{n+1}^M$ y, en

consecuencia,

$$|\rho_n|^M = \left| \{ \sigma \in SV^{\mathbb{P}} \mid \sigma \subset \{\check{i} \mid i \in \omega\} \times B \} \right|^M \leq (2^{\aleph_0 \cdot \aleph_{n+1}})^M = \aleph_{n+2}^M.$$

Sea $f \in M$ tal que $f : \omega_{n+1}^M \longrightarrow \rho_n$ suprayectiva y llamemos

$$\tau = \{ (\text{po}(\check{\alpha}, f(\alpha)), \mathbf{1}) \mid \alpha \in \omega_{n+1}^M \} \in M^{\mathbb{P}}.$$

Si $g \in H_n$ y $\alpha \in \omega_{n+1}^M$, entonces $g(f(\alpha)) = f(\alpha)$, por lo que $H_n \subset \text{Sim}_H(\tau)$. Por consiguiente $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$ y $\tau_G \in N$ es una aplicación de dominio ω_{n+1}^M y cuyo rango contiene a A_n . Teniendo en cuenta que ω_{n+1}^M es bien ordenable en N , de aquí se sigue que $|A_n|^N \leq |\omega_{n+1}^M|^N = \aleph_0$.

En definitiva, $\{A_n\}_{n \in \omega}$ es una familia numerable^N de subconjuntos numerables^N de $(\mathcal{P}\omega)^N$. Para concluir la prueba basta ver que

$$(\mathcal{P}\omega)^N = \bigcup_{n \in \omega} A_n.$$

Si $x \in (\mathcal{P}\omega)^N$, entonces $x = \pi_G$, para cierto $\pi \in SM^{\mathbb{P}}$. Tomemos un $n \in \omega$ tal que $H_n \subset \text{Sim}_H(\pi)$. Sea

$$\sigma = \{(\check{i}, p) \mid i \in \omega \wedge p \in \mathbb{P} \wedge p \subset (n+1) \times \omega \times \omega_{n+1}^M \wedge p \Vdash_S \check{i} \in \pi\}.$$

Es claro que $H_n \subset \text{Sim}_H(\sigma)$, por lo que $\sigma \in SM^{\mathbb{P}}$, $(\sigma, \mathbf{1}) \in \rho_n$ y $\sigma_G \in A_n$. Basta probar que $x = \pi_G = \sigma_G$.

Si $i \in \sigma_G$, entonces existe $p \in G$ tal que $(\check{i}, p) \in \sigma$. En particular $p \Vdash_S \check{i} \in \pi$, luego $i \in \pi_G$.

Recíprocamente, si $i \in \pi_G$ existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash_S \check{i} \in \pi$. Por (*) tenemos que $p|_{n+1} \Vdash_S \check{i} \in \pi$, y como $p \leq p|_{n+1}$ también $p|_{n+1} \in G$. Claramente $(\check{i}, p|_{n+1}) \in \sigma$, luego $i \in \sigma_G$. ■

En particular vemos que sin el axioma de elección no puede definirse consistentemente la suma infinita de cardinales, pues ciertamente ω puede descomponerse en unión numerable de conjuntos numerables, de modo que podemos tener dos familias numerables $\{A_n\}_{n \in \omega}$ y $\{B_n\}_{n \in \omega}$ de conjuntos numerables cuyas uniones tengan cardinales distintos.

Para terminar probamos que el principio de elecciones dependientes es estrictamente más fuerte que el axioma de elección numerable:

Teorema 6.63 *Si ZF es consistente, también lo es ZF + AEN + \neg ED.*

DEMOSTRACIÓN: Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC + $V = L$, sea $\kappa = \omega_1^M$ y sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(\kappa^{<\omega} \times \kappa, 2, \kappa)^M$. Observemos que \mathbb{P} es semejante (en M) a $\text{Fn}(\kappa, 2, \kappa)$, luego ambos c.p.o.s determinan las mismas extensiones genéricas, pero nos será más cómodo trabajar con \mathbb{P} .

Consideramos a $\kappa^{<\omega}$ con la estructura de árbol dada por la inclusión y llamamos H al grupo de todas las semejanzas de $\kappa^{<\omega}$, es decir, las biyecciones

que conservan la inclusión. Cada $f \in H$ se identifica con el automorfismo de \mathbb{P} dado por

$$f(p) = \{(f(s), \alpha, i) \mid (s, \alpha, i) \in p\}.$$

Un *subárbol* de $\kappa^{<\omega}$ es un subconjunto $T \subset \kappa^{<\omega}$ tal que

$$\bigwedge s \in \kappa^{<\omega} \bigwedge t \in T (s \subset t \rightarrow s \in T).$$

Diremos que es un *árbol pequeño* si además es numerable y no tiene ramas infinitas.

Definimos \mathcal{F} como el filtro formado por los subgrupos de H que contienen al estabilizador de un árbol pequeño. Es fácil ver que se trata de un filtro normal de subgrupos de H . Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sea $N = SM[G]$ la extensión simétrica correspondiente. Veamos que cumple lo requerido.

Es claro que $F_G = \bigcup G$ es una función $F_G : \kappa^{<\omega} \times \kappa \rightarrow 2$, que a su vez nos permite definir, para cada $s \in \kappa^{<\omega}$, el conjunto

$$a_s = \{\alpha \in \kappa \mid F_G(s, \alpha) = 1\} \in M[G].$$

De hecho, un nombre canónico para a_s es

$$\sigma_s = \{(\check{\alpha}, p) \mid \alpha < \kappa \wedge p \in \mathbb{P} \wedge (s, \alpha, 1) \in p\}.$$

Claramente $T_s = \{t \in \kappa^{<\omega} \mid t \subset s\}$ es un árbol pequeño y $\text{Est}_H(T_s) \subset \text{Sim}_H(\sigma_s)$, luego $\sigma_s \in SM^{\mathbb{P}}$ y, por consiguiente, $a_s = (\sigma_s)_G \in N$.

Como G es genérico, es fácil ver que si $s \neq t$, entonces $a_s \neq a_t$.

Observemos que si $f \in H$ entonces $f(\sigma_s) = \sigma_{f(s)}$. Esto hace que

$$\sigma = \{(\sigma_s, \mathbb{1}) \mid s \in \kappa^{<\omega}\} \in SM^{\mathbb{P}},$$

pues su grupo de simetrías es H . Por lo tanto, $A = \sigma_G = \{a_s \mid s \in \kappa^{<\omega}\} \in N$. Sea

$$\rho = \{(\text{p.o.}(\sigma_s, \sigma_t), \mathbb{1}) \mid s, t \in \kappa^{<\omega} \wedge t \subset s \wedge \ell(s) = \ell(t) + 1\}.$$

Es claro también que $\text{Sim}_H(\rho) = H$, por lo que $\pi \in SM^{\mathbb{P}}$ y $R = \rho_G \in N$, donde

$$R = \{(a_s, a_t) \mid s, t \in \kappa^{<\omega} \wedge t \subset s \wedge \ell(s) = \ell(t) + 1\}.$$

Por consiguiente, en N se cumple

$$R \subset A \times A \wedge \bigwedge a \in A \bigvee b \in A \, b \, R \, a.$$

Si N cumpliera el principio de elecciones dependientes existiría $h : \omega \rightarrow A$ tal que $h \in N$ y $\bigwedge n \in \omega \, h(n+1) \, R \, h(n)$. Existe (en $M[G]$, pero no necesariamente en N) una aplicación $s : \omega \rightarrow \kappa^{<\omega}$ tal que $\bigwedge n \in \omega \, h(n) = a_{s(n)}$. A su vez, esto implica que $s(n+1) \subset s(n)$ y $\ell(s(n+1)) = \ell(s(n)) + 1$. Añadiendo un número finito de términos a la sucesión, no perdemos generalidad si suponemos que $\ell(s(n)) = n$.

Sea $h = \tau_G$, con $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$. Esto implica que existe un árbol pequeño T tal que $\text{Est}_H(T) \subset \text{Sim}_H(\tau)$. Como es un árbol pequeño, existe un $n_0 \in \omega \setminus \{0\}$ tal que $s_0 = s(n_0) \notin T$. Sea $p \in G$ tal que

$$p \Vdash_S (\tau : \omega \longrightarrow \sigma \wedge \tau(\check{n}_0) = \sigma_{s_0}).$$

Como T es numerable^M, existe un $\alpha < \kappa$ tal que

$$s_1 = s_0|_{n_0-1} \cup \{(n_0 - 1, \alpha)\} \notin T \wedge s_1 \neq s_0.$$

Más aún, como p es numerable podemos elegir α de modo que p no contenga ninguna terna de la forma (t, β, i) con $\alpha \in \mathcal{R}t$.

Sea $f \in H$ la semejanza de $\kappa^{<\omega}$ que deja invariantes a los nodos que no extienden a s_0 ni a s_1 y que intercambia las extensiones de s_0 con las de s_1 . En particular $f(s_0) = s_1$ y $f \in \text{Est}_H(T)$, ya que, al ser T un árbol, ninguno de sus elementos extiende a s_0 o a s_1 . Además, $\neg p \perp f(p)$, pues si $(t, \beta, i) \in p$, entonces $(f(t), \beta, i)$ es la misma terna (t, β, i) o bien t extiende a s_0 , en cuyo caso $f(t)$ extiende a s_1 , luego contiene a α en su rango, luego $(f(t), \beta, 1-i) \notin p$.

Concluimos que $f(p) \Vdash_S \tau(\check{n}_0) = \sigma_{s_1}$, luego una extensión común q de p y $f(p)$ cumple $q \Vdash_S (\tau : \omega \longrightarrow \sigma \wedge \tau(\check{n}_0) = \sigma_{s_0} \wedge \tau(\check{n}_0) = \sigma_{s_1})$, luego llegamos a que $q \Vdash_S \sigma_{s_0} = \sigma_{s_1}$, lo cual es imposible.

Esto prueba que N no cumple ED. Veamos ahora que sí que cumple AEN.

Sea $\{X_n\}_{n \in \omega} \in N$ una familia numerable de conjuntos no vacíos y supongamos que no tiene una función de elección en N , es decir, que no existe ninguna sucesión $\{x_n\}_{n \in \omega} \in N$ tal que $\bigwedge n \in \omega x_n \in X_n$. En cualquier caso, sí que existe una función de elección $\{x_n\}_{n \in \omega} \in M[G]$, que a su vez determina una función $\{\sigma_n\}_{n \in \omega}$ tal que $\tau_n \in SM^{\mathbb{P}}$ y $\tau_{nG} = x_n \in X_n$.

Ahora usamos que \mathbb{P} es claramente (\aleph_1 -cerrado)^M, por lo que 5.8 nos da que $\{\tau_n\}_{n \in \omega} \in M$. Ahora usamos el axioma de elección en M para obtener $\{T_n\}_{n \in \omega} \in M$ tal que cada T_n sea un árbol pequeño y $\text{Est}_H(T_n) \subset \text{Sim}_H(\tau_n)$. Por otra parte, sea $\{X_n\}_{n \in \omega} = \pi_G$, con $\pi \in SM^{\mathbb{P}}$ y sea T un árbol pequeño tal que $\text{Est}_H(T) \subset \text{Sim}_H(\pi)$.

Sea $p^* \in G$ una condición tal que $p^* \Vdash_S (\pi \text{ es una familia numerable de conjuntos no vacíos sin función de elección})$. Podemos definir una sucesión $\{p_n\}_{n \in \omega}$ de condiciones decrecientes en G tales que

$$p_n \leq p^* \wedge p_n \Vdash_S \tau_n \in \pi(\check{n}).$$

Usando nuevamente que (\mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado)^M obtenemos una condición $p \in \mathbb{P}$ que extiende a todas las condiciones p_n (y en particular a p^*).

Ahora vamos a definir (en M) semejanzas $f_n \in \text{Est}_H(T)$ de manera que $T^* = \bigcup_{n \in \omega} f_n[T_n]$ sea un árbol pequeño y cada $f_n(p)$ sea compatible con p y con todos los $f_i(p)$, para $i < n$.

Admitiendo esto, usando que $(\mathbb{P} \text{ es } \aleph_1\text{-cerrado})^M$ podemos obtener una condición $q \in \mathbb{P}$ que extienda a p y todas las condiciones $f_n(p)$. Definimos

$$\tau' = \{(p.o.(\check{n}, f_n(\tau_n), \mathbb{1}) \mid n \in \omega)\},$$

y se cumple que

$$\text{Est}_H(T^*) \subset \text{Est}_H(f_n[T_n]) \subset \text{Est}_H(f_n(\tau_n)),$$

luego $\text{Est}_H(T^*) \subset \text{Est}_H(\tau')$ y $\tau' \in SM^{\mathbb{P}}$. Además, claramente $\mathbb{1} \Vdash_S \tau' : \omega \longrightarrow V$ y $\mathbb{1} \Vdash_S \tau'(\check{n}) = f_n(\tau_n)$.

Entonces $f(p_n) \Vdash_S f_n(\tau_n) \in \pi(\check{n})$, luego $q \Vdash_S \tau'(\check{n}) \in \pi(\check{n})$. Es claro entonces que $q \Vdash_S (\tau' \text{ es una función de elección para } \pi)$ y, como $q \leq p$, también fuerza lo contrario, y tenemos una contradicción.

Sólo queda, pues, construir las semejanzas f_n . Suponemos construidas f_i , para $i < n$. Consideramos el árbol T_n y sea $\{t_\alpha\}_{\alpha < \beta}$ una enumeración de los elementos de $t \in T_n \setminus T$ tales que $t|_{\ell(t)-1} \in T$ (notemos que $0 \leq \beta < \kappa$). Sea $\gamma_\alpha = t_\alpha(\ell(t_\alpha) - 1)$ y sea $\{\delta_\alpha\}_{\alpha < \beta}$ una sucesión de ordinales menores que κ que no aparezcan en el rango de ningún elemento de T , ni de los árboles $f_i(T_i)$ para $i \leq n$, ni en los rangos de las primeras componentes de los elementos de p o de algún $f_i(p)$.

Sea t'_α la sucesión que coincide con t_α salvo su último elemento, que es δ_α en lugar de γ_α . Llamamos f_n a la semejanza que intercambia las extensiones de cada t_α con las de t'_α .

Como ninguna extensión de ningún t_α (ni mucho menos de ningún t'_α) puede estar en T , es inmediato que $f \in \text{Est}_H(T)$.

Además $f_n(p)$ es compatible con p y con todos los $f_i(p)$, para $i < n$. En efecto, un elemento de $f_n(p)$ es de la forma $(f_n(t), \epsilon, i)$, donde $(t, \epsilon, i) \in p$. Si $f_n(t) = t$, entonces (t, ϵ, i) no puede dar lugar a ninguna incompatibilidad con p ni con ningún $f_i(p)$, pues todos ellos son compatibles con p .

Si $f_n(t) \neq t$, es porque t extiende a un t_α (no puede extender a un t'_α , porque entonces contendría a δ_α en su rango, luego (t, ϵ, i) no podría estar en p). Tenemos entonces que $f_n(t)$ contiene un δ_α en su rango, por lo que $(f_n(t), \epsilon, 1-i)$ no puede aparecer ni en p ni en ningún $f_i(t)$, luego (t, ϵ, i) no puede dar lugar a ninguna contradicción.

Sólo falta probar que $T^* = \bigcup_{n \in \omega} f_n[T_n]$ es un árbol pequeño. Ciertamente es un árbol numerable, y falta ver que no contiene cadenas infinitas. Si $\{t_k\}_{k \in \omega}$ fuera una cadena infinita en T^* (digamos con $\ell(t_k) = k$), existiría un k tal que $t_k \in T$ y $t_{k+1} \notin T$ (notemos que $t_0 = \emptyset \in T$). Digamos que $t_{k+1} \in f_n[T_n]$. Entonces, por construcción, tiene un δ_α en su rango que no está en el rango de ningún otro $f_i[T_i]$, luego todos los t_l para $l \geq k+1$ deberían estar en $f_n[T_n]$, pero eso es imposible, porque $f_n[T_n]$ es un árbol pequeño. ■

Capítulo VII

El teorema de los ultrafiltros

Vamos a probar algunos resultados de consistencia sobre el teorema de los ultrafiltros (TU) [TC 10.37] o a su equivalente, el teorema de los ideales primos [TC 10.36]. Otras equivalencias son las dadas en el teorema [TC 11.8]. Ahora ya sabemos que no puede demostrarse sin el axioma de elección, pues implica, por ejemplo, que todo conjunto puede ser totalmente ordenado [TC 11.14] y en el capítulo anterior hemos visto (teorema 6.59) que esto no es necesariamente cierto sin AE.

El resultado principal que vamos a obtener es que TU no implica AE, porque TU es verdadero en el *primer modelo de Cohen*, que no es sino el modelo considerado en el teorema 6.57 (mientras que el *segundo modelo de Cohen* es el del teorema 6.59). Este resultado no es trivial en absoluto, y requiere que estudiemos mucho más a fondo la estructura de este modelo.

7.1 El primer modelo de Cohen

Según acabamos de indicar, el primer modelo de Cohen es el modelo considerado en el teorema 6.57, el más elemental de los modelos simétricos que prueban la independencia del axioma de elección. Lo recordamos a continuación junto con algunos hechos adicionales.

Las condiciones El conjunto de condiciones del primer modelo de Cohen es, como ya sabemos, $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega \times \omega, 2, \aleph_0)$. En teoría podríamos considerar equivalentemente $\text{Fn}(\omega, 2, \aleph_0)$, pero es más cómodo tomar $\omega \times \omega$ como dominio de las funciones parciales para construir infinitos conjuntos genéricos.

Necesitaremos trabajar también con la compleción \mathbb{B} de \mathbb{P} . Identificando las condiciones de \mathbb{P} con sus imágenes en \mathbb{B} podemos suponer que \mathbb{P} es un subconjunto denso de \mathbb{B} .

Veamos algunos hechos elementales:

- A través de esta identificación, si $p, q \in \mathbb{P}$ son condiciones compatibles, se cumple que $p \wedge q = p \cup q$.

En efecto, $p \cup q \leq p$ y $p \cup q \leq q$, luego $p \cup q \leq p \wedge q$ y, si no se diera la desigualdad opuesta, existiría $r \in \mathbb{P}$ tal que $r \leq p \wedge q$ y $r \perp (p \cup q)$, pero entonces $p \subset r$ y $q \subset r$, luego $p \cup q \subset r$ y $r \leq p \cup q$, contradicción.¹

- Que \mathbb{P} sea denso en \mathbb{B} se traduce en que cada $b \in \mathbb{B}$ cumple

$$b = \bigvee \{p \in \mathbb{P} \mid p \leq b\}.$$

En efecto, una desigualdad es obvia y, si no se da la contraria, entonces

$$\bigvee \{p \in \mathbb{P} \mid p \leq b\} \wedge b' \neq \emptyset,$$

pero esto es absurdo, porque equivale a que $\bigvee \{p \wedge b' \mid p \in \mathbb{P} \wedge p \leq b\} \neq \emptyset$, cuando cada $p \wedge b' = \emptyset$, luego el supremo es \emptyset .

- En particular, $\mathbb{B} = \{\bigvee X \mid X \subset \mathbb{P}\}$.

Si $e \subset \omega$, definimos $\mathbb{P}_e = \text{Fn}(e \times \omega, 2, \aleph_0) \subset \mathbb{P}$. Es inmediato comprobar que la inclusión $\mathbb{P}_e \rightarrow \mathbb{P}$ es una inmersión completa. Concretamente, una reducción de una condición $p \in \mathbb{P}$ a \mathbb{P}_e es la condición

$$p : e = p \cap (e \times \omega \times 2).$$

Si llamamos \mathbb{B}_e a la compleción de \mathbb{P}_e , según [TC 10.22], la inclusión $\mathbb{P}_e \rightarrow \mathbb{P}$ se extiende a un monomorfismo completo $\mathbb{B}_e \rightarrow \mathbb{B}$, que nos permite identificar a \mathbb{B}_e con una subálgebra completa de \mathbb{B} . Concretamente

$$\mathbb{B}_e = \{\bigvee X \mid X \subset \mathbb{P}_e\},$$

es decir, \mathbb{B}_e está formada por los elementos de \mathbb{B} que son supremos de subconjuntos de \mathbb{P}_e .

Teorema 7.1 *Para cada $b \in \mathbb{B}$ no nulo, la condición*

$$b : e = \bigvee \{p : e \mid p \in \mathbb{P} \wedge p \leq b\} \in \mathbb{B}_e.$$

es la mayor reducción de b a \mathbb{B}_e .

DEMOSTRACIÓN: Observemos en primer lugar que esta definición coincide sobre la que ya teníamos sobre elementos de \mathbb{P} . En efecto, si llamamos de momento $(p : e)^1 = p \cap (e \times \omega \times 2)$ y $(p : e)^2$ a la condición definida en el enunciado, por una parte, como $p \leq b$, tenemos que $(p : e)^1 \leq (p : e)^2$ y, si $q \leq p$, entonces $(q : e)^1 \leq (p : e)^1$, luego tomando el supremo en q resulta que $(p : e)^2 \leq (p : e)^1$.

¹En cambio, no es cierto en general que $p \vee q = p \cap q$. Basta considerar las condiciones $p = \{(0, 0, 0), (0, 1, 0)\}$, $q = \{(0, 0, 0), (0, 2, 0)\}$ y $r = \{(0, 0, 0), (0, 1, 1), (0, 2, 1)\}$. Se cumple que $r \leq p \cap q$, pero $r \wedge p = r \wedge q = \emptyset$, luego $r \wedge (p \vee q) = \emptyset$.

Ahora observamos que si $b \neq \emptyset$ existe $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \leq b$, luego $p : e \leq b : e$, luego $b : e \neq \emptyset$.

Que $b : e$ es una reducción significa que si $c \in \mathbb{B}_e$ no nulo cumple $c \leq b : e$, entonces $\neg c \perp b$. Vamos a probar, de hecho, que si $c \perp b$ entonces $c \perp b : e$.

En efecto, supongamos $c \perp b$, donde $c = \bigvee X$, con $X \subset \mathbb{P}_e$. Sea $p \in X$ y sea $q \in \mathbb{P}$ tal que $q \leq b$. Entonces $p \perp q$ y, como $p \in \mathbb{P}_e$, necesariamente $p \perp q : e$. Por consiguiente,

$$p \wedge b : e = \bigvee \{p \wedge q : e \mid q \in \mathbb{P} \wedge q \leq b\} = \emptyset.$$

Y a su vez,

$$c \wedge b : e = \bigvee \{p \wedge b : e \mid p \in X\} = \emptyset.$$

Supongamos ahora que $c \in \mathbb{B}_e$ es una reducción de b a \mathbb{B}_e . Sea $c = \bigvee X$, con $X \subset \mathbb{P}_e$. Basta probar que si $x \in X$, entonces $x \leq b : e$. En caso contrario, como $x, b : e \in \mathbb{B}_e$, también $x \wedge (b : e)' \in \mathbb{B}_e$ y es no nulo, luego existe $p \in \mathbb{P}_e$ tal que $p \leq x$ y $p \perp b : e$, pero entonces $p \leq x \leq c$ y, como c es una reducción de b , se cumple que $\neg p \perp b$, luego existe $q \in \mathbb{P}$ tal que $q \leq p$, $q \leq b$, pero, como $p \in \mathbb{P}_e$, tenemos que $q : e \leq p : e = p$, y también $q : e \leq b : e$, contradicción. ■

Como consecuencia:

Teorema 7.2 Si $e \subset \omega$ y $b \in \mathbb{B}$, entonces $b \leq b : e$, y si $b \in \mathbb{B}_e$ entonces $b = b : e$.

DEMOSTRACIÓN: Si $p \in \mathbb{P}$ cumple $p \leq b$ entonces $p \leq p : e \leq b : e$, luego $b \leq b : e$. Si $b \in \mathbb{B}_e$ pero no se cumple $b : e \leq b$, existe un $p \in \mathbb{P}_e$ tal que $p \leq b : e$ y $p \perp b$, pero esto contradice que $b : e$ es una reducción de b a \mathbb{B}_e . ■

En particular vemos que $\mathbb{B}_e = \{b : e \mid b \in \mathbb{B}\}$.

El grupo de simetrías Fijamos ahora $H = \Sigma_\omega$, el grupo de todas las permutaciones de ω , e identificamos cada $f \in H$ con el automorfismo de \mathbb{P} dado por

$$f(p) = \{(f(i), n, r) \mid (i, n, r) \in p\},$$

el cual a su vez se extiende a un único automorfismo de \mathbb{B} . Para cada $e \subset \omega$, definimos su estabilizador como el subgrupo

$$\text{Est}(e) = \{f \in \Sigma_\omega \mid \bigwedge i \in e f(i) = i\}.$$

El automorfismo de \mathbb{B} inducido por $f \in \Sigma_\omega$ induce a su vez una biyección $f : V^\mathbb{B} \longrightarrow V^\mathbb{B}$ que nos permite definir el grupo de simetrías de $\tau \in V^\mathbb{B}$ como

$$\text{Sim}(\tau) = \{f \in \Sigma_\omega \mid f(\tau) = \tau\}.$$

Consideramos el filtro \mathcal{F} formado por todos los subgrupos de Σ_ω que contienen al estabilizador de un conjunto finito $e \subset \omega$.

Un nombre $\tau \in V^\mathbb{B}$ es simétrico si $\text{Sim}(\tau) \in \mathcal{F}$, es decir, si existe $e \subset \omega$ finito tal que $\text{Est}(e) \subset \text{Sim}(\tau)$, y en tal caso diremos que e es un *soporte* de τ .

La clase $SV^{\mathbb{B}}$ de los nombres hereditariamente simétricos está formada por los nombres τ que son simétricos y $\mathcal{D}\tau \subset SV^{\mathbb{B}}$.

El teorema siguiente es elemental, pero no es trivial en absoluto:

Teorema 7.3 *Sean $e_1, e_2 \subset \omega$ finitos, sea $e = e_1 \cap e_2$ y sea $f \in \text{Est}(e)$. Entonces f se descompone como $f = f_1 \circ \dots \circ f_n$ con cada $f_i \in \text{Est}(e_1) \cup \text{Est}(e_2)$.*

DEMOSTRACIÓN: Vamos a probar que existe $g_k : \omega \longrightarrow \omega$ que es composición de funciones en las condiciones del enunciado y que coincide con f en al menos k elementos de $e_1 \cup e_2$ (para $k \leq |e_1 \cup e_2|$).

En efecto, tomamos como g_0 la identidad en ω . Supuesta definida g_k y suponiendo que $k < |e_1 \cup e_2|$, sea $A = \{n \in e_1 \cup e_2 \mid f(n) = g_k(n)\}$. Notemos que $e \subset A$.

Si $|A| \geq k+1$ basta tomar $g_{k+1} = g_k$. En caso contrario sea $x \in (e_1 \cup e_2) \setminus A$ y sea $y \in \omega$ tal que $g_k(y) = f(x)$. Claramente $y \neq x$, y a su vez esto implica que $y \notin A$, pues en tal caso tendríamos que $f(y) = g_k(y) = f(x)$, luego $x = y \in A$. Sea $z \in \omega \setminus (e_1 \cup e_2)$.

Definimos $g_{k+1} = (x, z) \circ (z, y) \circ g$, donde (x, z) representa la biyección que intercambia x con z y (z, y) la que intercambia z con y . Claramente, cada una de ellas fija a e_1 o a e_2 , según a cuál de los dos conjuntos no pertenezca y (notemos que $y \notin e \subset A$). Entonces, $g_{k+1}(x) = g(y) = f(x)$ y $g_{k+1}|_A = g|_A = f|_A$, luego g_{k+1} cumple lo pedido.

De este modo obtenemos una biyección $g : \omega \longrightarrow \omega$ que es composición de un número finito de funciones de $\text{Est}(e_1) \cup \text{Est}(e_2)$ y tal que $f|_{e_1 \cup e_2} = g|_{e_1 \cup e_2}$. Entonces $h = f \circ g^{-1} \in \text{Est}(e_1 \cup e_2)$, luego $f = h \circ g$ tiene la forma requerida por el enunciado. ■

Como consecuencia obtenemos:

Teorema 7.4 *Todo $\tau \in SV^{\mathbb{B}}$ tiene un soporte mínimo que está contenido en cualquier otro de sus soportes.*

DEMOSTRACIÓN: En primer lugar observamos que si e_1 y e_2 son soportes de τ , entonces $e_1 \cap e_2$ también lo es. En efecto, por el teorema anterior, toda $f \in \text{Est}(e_1 \cap e_2)$ puede expresarse como composición de un número finito de permutaciones $f_i \in \text{Est}(e_1) \cup \text{Est}(e_2)$, lo que implica claramente que $f(\tau) = \tau$.

Por lo tanto, si e es un soporte de τ de cardinal mínimo, tiene que estar contenido en cualquier otro soporte e' , ya que $e \cap e' \subset e$ es también un soporte, luego $e = e \cap e' \subset e'$. ■

Definición 7.5 Llamaremos *soporte* de un nombre $\tau \in SV^{\mathbb{B}}$ a su soporte mínimo, y lo representaremos por $\text{sop } \tau$.

Teorema 7.6 *Si $\tau \in SV^{\mathbb{B}}$ y $f, g \in \Sigma_{\omega}$, se cumple:*

- a) $\text{sop } f(\tau) = f[\text{sop } \tau]$.
- b) Si $f|_{\text{sop } \tau} = g|_{\text{sop } \tau}$, entonces $f(\tau) = g(\tau)$.

DEMOSTRACIÓN: a) Si llamamos $e = \text{sop } \tau$, para cada

$$g \in \text{Est}(f[e]) = \text{Est}(e)^f$$

se cumple que $g^{f^{-1}} \in \text{Est}(e) \subset \text{Sim}(\tau)$, luego $(f \circ g \circ f^{-1})(\tau) = \tau$, es decir, $f^{-1}(g(f(\tau))) = \tau$, luego $g(f(\tau)) = f(\tau)$, luego $g \in \text{Sim}(f(\tau))$. Esto prueba que $f[e]$ es un soporte de $f(\tau)$, luego $\text{sop } f(\tau) \subset f[\text{sop } \tau]$.

En particular, esto vale para f^{-1} y $f(\tau)$, con lo que tenemos la inclusión $\text{sop } \tau \subset f^{-1}[\text{sop } f(\tau)]$, de donde $f[\text{sop } \tau] \subset \text{sop } f(\tau)$ y tenemos la igualdad.

b) Basta observar que $f \circ g^{-1} \in \text{Est}(e)$, luego $g^{-1}(f(\tau)) = \tau$, con lo que $f(\tau) = g(\tau)$. ■

Diremos que e es un *soporte* de una condición $p \in \mathbb{P}$ si $p \in \mathbb{P}_e$. En este caso es obvio que cada condición p tiene un soporte mínimo,

$$\text{sop } p = \{i \in \omega \mid \bigvee n j \in \omega (i, n, j) \in p\}.$$

La extensión simétrica A partir de este punto relativizamos todo lo expuesto en los apartados precedentes a un modelo transitivo numerable M de ZFC + $V = L$. Se cumple que \mathbb{P} es absoluto, pero a partir de ahora \mathbb{B} será \mathbb{B}^M , es decir, la compleción de \mathbb{P} en M . Definimos

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \{(\check{n}, p) \mid p \in \mathbb{P} \wedge (i, n, 1) \in p\} \in SM^{\mathbb{P}}, \\ \sigma &= \{(\sigma_n, \mathbb{1}) \mid n \in \omega\} \in SM^{\mathbb{P}}. \end{aligned}$$

Notemos que si $f \in \Sigma_\omega$ se cumple que $f(\sigma_i) = \sigma_{f(i)}$, por lo que $\text{sop } \sigma_i = \{i\}$, mientras que $\text{sop } \sigma = \emptyset$.

Así, fijado un filtro genérico G , el primer modelo de Cohen es la extensión simétrica $N = SM[G]$, que contiene a la función genérica $f_G : \omega \times \omega \rightarrow 2$ y a los conjuntos genéricos

$$s_i = \sigma_{iG} = \{n \in \omega \mid f_G(i, n) = 1\},$$

así como al conjunto formado por todos ellos:

$$A = \sigma_G = \{s_i \mid i \in \omega\}.$$

Podemos pensar que cada condición $p \in \mathbb{P}$ contiene información posible sobre algunos de los conjuntos genéricos s_i . Concretamente, si $p \in \mathbb{P}_e$, entonces p sólo aporta información sobre los conjuntos s_i con $i \in e$.

En el teorema 6.57 hemos visto que alguien que “viva” en N puede ver el conjunto $A \subset \mathcal{P}\omega$ (y, por lo tanto, todos sus elementos), pero no puede ver la enumeración $\{s_i\}_{i \in \omega}$, ni ninguna otra. El conjunto A se puede “ver” pero “no se puede contar”.

Una situación similar es la siguiente: alguien que “viva” en N o en $M[G]$ puede “ver” el conjunto $SM^{\mathbb{B}}$ (aunque para él será la clase $SL^{\mathbb{B}}$), pero sólo quien “vive” en $M[G]$ puede ver el filtro genérico G (dicho filtro no está en N , pues si estuviera permitiría definir la sucesión $\{s_i\}_{i \in \omega}$).

Por lo tanto, dado un nombre $\tau \in SM^{\mathbb{B}}$, alguien que “viva” en $M[G]$ puede determinar el conjunto τ_G a que hace referencia, mientras que, en principio, alguien que “viva” en N “ve” los nombres, y puede reconocer que sean hereditariamente simétricos, pero no sabe qué conjunto nombra cada uno. De hecho, la sucesión $\{\sigma_i\}_{i \in \omega}$ está en $M \subset N$, de modo que si en N pudiera determinarse cuál es el conjunto nombrado por cada nombre, el conjunto A sería numerable en N .

Pese a todo esto, vamos a ver que, con ciertas restricciones, es posible calcular en N el valor de un nombre con soporte e a partir de la sucesión finita de conjuntos genéricos $\{s_i\}_{i \in e} \in N$.

Definición 7.7 Una *asignación* es una aplicación inyectiva $t : e \rightarrow A$, donde $e \subset \omega$ es finito. Llamaremos $\text{As} \in N$ al conjunto de todas las asignaciones.

Definimos las asignaciones con dominios en conjuntos de números naturales por comodidad, pero la idea es que cada asignación t determina una posible interpretación en A de un número finito de nombres σ_i . Así, las interpretaciones “verdaderas” son las que a cada σ_i les asignan como interpretación s_i (o, en los términos en que hemos definido en la práctica las asignaciones, las de la forma $t(i) = s_i$). Sin embargo, de momento necesitamos tratar por igual con asignaciones “verdaderas” y “falsas” por razones de simetría.

Notemos que cada aplicación $\pi : e \rightarrow \omega$ inyectiva determina una asignación, la dada por $t(i) = s_{\pi i}$, y toda asignación es de esta forma, para una π únicamente determinada. Definimos

$$\tau_\pi = \{(\text{p.o.}(\bar{i}, \sigma_{\pi i}), \mathbf{1}) \mid i \in e\} \in SM^{\mathbb{P}}.$$

A los nombres de esta forma los llamaremos *nombres canónicos de asignaciones*. Es claro que $\text{sop } \tau_\pi = \pi[e]$. También es claro que $(\tau_\pi)_G$ es la asignación determinada por π .

Dado $\alpha \in \Omega^M$, consideramos el conjunto

$$D_\alpha = \{(\rho, t) \in (SM^{\mathbb{B}} \cap V_\alpha) \times \text{As} \mid \text{sop } \rho \subset \mathcal{D}t\} \in N,$$

es decir, el conjunto de los pares (ρ, t) formados por un nombre de rango $< \alpha$ y una asignación cuyo dominio contenga el soporte del nombre.

Si $(\rho, t) \in D_\alpha$ y $t : e \rightarrow A$ viene dada por $t(i) = s_{\pi i}$, consideramos cualquier $f \in \Sigma_\omega^M$ tal que $f|_e = \pi$. Entonces, por el teorema 7.6 b), el nombre $f(\rho)$ sólo depende de π , luego de t , luego podemos definir $\text{Val}_\alpha(\rho, t) = f(\rho)_G$, y así tenemos una aplicación $\text{Val}_\alpha : D_\alpha \rightarrow N$.

Teorema 7.8 Para todo ordinal $\alpha \in \Omega^M$, la función $\text{Val}_\alpha : D_\alpha \rightarrow N$ está en N y, si α es suficientemente grande, se cumple:

- a) $\text{Val}_\alpha(\sigma_i, t) = t(i).$
- b) $\text{Val}_\alpha(\sigma, t) = A.$

- c) Si t y t' coinciden en $\text{sop } \rho$, entonces $\text{Val}_\alpha(\rho, t) = \text{Val}_\alpha(\rho, t')$.
- d) Si $s : e \rightarrow A$ es la asignación dada por $s(i) = s_i$ y $\rho \in SM^{\mathbb{B}}$ tiene rango $< \alpha$ y soporte contenido en e , entonces $\text{Val}_\alpha(\rho, s) = \rho_G$.
- e) En particular, si $\text{sop } \rho = \emptyset$, se cumple que $\text{Val}_\alpha(\rho, t) = \rho_G$.
- f) Más concretamente, si $x \in M$ entonces $\text{Val}_\alpha(\check{x}, t) = x$.

DEMOSTRACIÓN: Para probar que la función está en N le encontramos un nombre canónico:

$$\begin{aligned} v_\alpha = & \{(p.o.(p.o.(\check{\rho}, \tau_\pi), f(\rho)), \mathbf{1}) \mid \rho \in SV^{\mathbb{B}} \cap V_\alpha \wedge \\ & \forall e (e \subset \omega \text{ finito} \wedge \text{sop } \rho \subset e \wedge f \in \Sigma_\omega \wedge \pi = f|_e)\}^M. \end{aligned}$$

Obviamente $v \subset SM^{\mathbb{B}}$, pero también es simétrico (con soporte \emptyset). En efecto, (razonando en M) si $g \in \Sigma_\omega$, entonces

$$(g(p.o.(p.o.(\check{\rho}, \tau_\pi), f(\rho))), g(\mathbf{1})) = (p.o.(p.o.(\check{\rho}, g(\tau_\pi)), g(f(\rho))), \mathbf{1}),$$

y

$$g(\tau_\pi) = \{(p.o.(\check{i}, g(\sigma_{\pi i})), \mathbf{1}) \mid i \in e\} = \{(p.o.(\check{i}, \sigma_{g(\pi i)}), \mathbf{1}) \mid i \in e\} = \tau_{\pi \circ g},$$

luego

$$g(p.o.(p.o.(\check{\rho}, \tau_\pi), f(\rho)), \mathbf{1}) = (p.o.(p.o.(\check{\rho}, \tau_{\pi \circ g}), (f \circ g)(\rho)), \mathbf{1}) \in v_\alpha,$$

luego $g(v_\alpha) \subset v_\alpha$, y aplicando esto a g^{-1} obtenemos la inclusión opuesta. Por consiguiente, $v_\alpha \in SM^{\mathbb{B}}$. Además

$$\begin{aligned} (v_\alpha)_G = & \{(\rho, (\tau_\pi)_G, f(\rho)_G) \mid \rho \in SM^{\mathbb{B}} \cap \alpha \wedge \\ & \forall e (e \subset \omega \text{ finito} \wedge \text{sop } \rho \subset e \wedge f \in \Sigma_\omega^M \wedge \pi = f|_e)\} = \text{Val}_\alpha. \end{aligned}$$

El resto del enunciado no ofrece dificultad. ■

También es fácil ver que si $\alpha \leq \beta$ entonces Val_β extiende a Val_α . De hecho, el ordinal α sólo se introduce para que Val_α sea un conjunto y podamos asignarle un nombre, pero no interviene a la hora de determinar quién es $\text{Val}_\alpha(\rho, t)$. Por lo tanto, podemos escribir simplemente $\text{Val}(\rho, t)$, entendiendo que se trata de $\text{Val}_\alpha(\rho, t)$ para α suficientemente grande.

La idea es que $\text{Val}(\rho, t)$ es el conjunto que nombraría ρ si el nombre canónico σ_i nombrara a $t(i)$, de modo que, cuando le damos la asignación “correcta” s , entonces $\text{Val}(\rho, s)$ es realmente el conjunto nombrado por ρ .

De este modo, desde N se pueden calcular los valores de los nombres a partir de las asignaciones s , pero hay que tener presente que, aunque cada una de ellas está en N , no son definibles en N , de modo que, si definimos s^n como la asignación “verdadera” de dominio n , no es cierto que la sucesión $\{s^n\}_{n \in \omega}$ esté en N . Por lo tanto, el cálculo de valores de nombres en N presenta ciertas restricciones esenciales de finitud.

Notemos también que no hemos demostrado que las sucesiones Val_α sean definibles en N , por lo que no podemos hablar de una fórmula metamatemática “ Val ” que determine una clase en N que extienda a todas las funciones Val_α . Dicha fórmula puede definirse en $M[G]$, pero ahí puede hacerse de forma mucho más directa y simple. No obstante, la función Val sí que es definible a efectos del cálculo de valores booleanos de fórmulas:

Si $\text{rang}(\rho) < \alpha$ y τ es un nombre canónico de una asignación, se cumple que

$$\eta_G = \text{Val}(\rho, \tau_G) \leftrightarrow \eta_G = (v_\alpha)_G((\check{\rho}_G, \tau_G)),$$

luego si definimos

$$\|\eta = \text{Val}(\rho, \tau)\|_S \equiv \|\eta = v_\alpha(\check{\rho}, \tau)\|_S$$

se cumple

$$\|\eta = \text{Val}(\rho, \tau)\|_S \in G \leftrightarrow \eta_G = \text{Val}(\rho, \tau_G),$$

por lo que el teorema fundamental vale para fórmulas ϕ que contengan como subfórmulas atómicas subfórmulas de tipo $x = \text{Val}(y, z)$ (en la prueba del teorema 6.50 por inducción sobre la longitud de ϕ podemos tomar la equivalencia precedente como un paso del argumento inductivo).

Notemos que si una expresión $\|\phi(\tau_1, \dots, \tau_n)\|_S$ contiene subfórmulas de tipo $\eta = \text{Val}(\rho, \tau)$, en realidad $\|\phi\|_S$ contiene un parámetro v_α que no explicitamos, pero teniendo en cuenta que v_α tiene soporte vacío, su presencia no afecta a la hora de aplicar resultados como que

$$f(\|\phi(\tau_1, \dots, \tau_n)\|_S) = \|\phi(f(\tau_1), \dots, f(\tau_n))\|_S,$$

o como el teorema siguiente, en el que hay que considerar los soportes de todos los nombres involucrados en ϕ . Más concretamente, el teorema afirma que para determinar si N cumple una determinada afirmación sólo necesitamos considerar condiciones que aporten información sobre los conjuntos genéricos correspondientes al soporte de los nombres involucrados:

Teorema 7.9 *Si $e \subset \omega$ finito es un soporte para $\tau_1, \dots, \tau_n \in SM^{\mathbb{B}}$ y $p \in \mathbb{P}$ cumple $p \Vdash_S \phi(\tau_1, \dots, \tau_n)$, entonces $p : e \Vdash_S \phi(\tau_1, \dots, \tau_n)$.*

DEMOSTRACIÓN: En caso contrario, existiría un filtro genérico G tal que $p : e \in G$ pero en la extensión simétrica correspondiente se cumpliría $\neg\phi$, luego existiría un $q \leq p : e$ tal que $q \Vdash_S \neg\phi(\tau_1, \dots, \tau_n)$. Sean $e_1 = \text{sop } p$, $e_2 = \text{sop } q$. Entonces existe $f \in \text{Est}(e)$ tal que $e_1 \cap f[e_2] \subset e$. Así, $\neg p \perp f(q)$ y tenemos que $f(q) \Vdash_S \neg\phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, puesto que $f \in \text{Est}(e)$, pero entonces una extensión común de p y $f(q)$ debería forzar ϕ y $\neg\phi$, contradicción. ■

Nota En las condiciones del teorema anterior se deduce inmediatamente que $\|\phi(\tau_1, \dots, \tau_n)\|_S \in \mathbb{B}_e$. En particular, si todos los nombres involucrados tienen soporte vacío, entonces $\|\phi(\tau_1, \dots, \tau_n)\|_S = \emptyset, \mathbf{1}$. ■

Demostramos ahora un resultado nada trivial, que muestra que podemos reducir todavía más el soporte de un nombre si estamos dispuestos a cambiarlo por otro equivalente:

Teorema 7.10 *Sean $\tau_1, \tau_2 \in SM^{\mathbb{B}}$, sea $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \Vdash_S \tau_1 = \tau_2$. Entonces existe $\tau \in SM^{\mathbb{B}}$ con soporte contenido en $\text{sop } \tau_1 \cap \text{sop } \tau_2$ tal que $p \Vdash_S \tau_1 = \tau$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $e_1 = \text{sop } \tau_1$ y $e_2 = \text{sop } \tau_2$. Sea $e = e_1 \cap e_2$. Por el teorema 7.9 podemos cambiar p por $p : (e_1 \cup e_2)$ y suponer que $\text{sop } p \subset e_1 \cup e_2$.

En el conjunto $SM^{\mathbb{B}} \cap V_{\text{rang } \tau_1}$ consideramos la relación de equivalencia

$$\rho_1 \sim \rho_2 \leftrightarrow \bigvee f \in \text{Est}(e) \quad \rho_1 = f(\rho_2).$$

Por el teorema 7.6, en cada clase de equivalencia podemos elegir siempre un ρ^* cuyo soporte $e^* = \text{sop } \rho^*$ cumpla $e^* \cap (e_1 \cup e_2) \subset e$. Vamos a comprobar que, para cualquier otro elemento de la clase, que será de la forma $\rho = f(\rho^*)$, con $f \in \text{Est}(e)$, el valor

$$\tau(\rho) = f((p \wedge \|\rho^* \in \tau_1\|_S) : (e^* \cup e))$$

es independiente de la elección de ρ^* o de f . Esto significa que si $f'(\rho') = f(\rho^*)$, con la condición de que $e' = \text{sop } \rho'$ y $e^* = \text{sop } \rho^*$ cumplan ambos que

$$e' \cap (e_1 \cup e_2) \subset e, \quad e^* \cap (e_1 \cup e_2) \subset e,$$

entonces

$$f'((p \wedge \|\rho' \in \tau_1\|_S) : (e' \cup e)) = f((p \wedge \|\rho^* \in \tau_1\|_S) : (e^* \cup e)).$$

Equivalentemente, considerando $g = f' \circ f^{-1}$, basta probar que si $g \in \text{Est}(e)$ cumple $\rho^* = g(\rho')$, entonces

$$g((p \wedge \|\rho' \in \tau_1\|_S) : (e' \cup e)) = (p \wedge \|\rho^* \in \tau_1\|_S) : (e^* \cup e).$$

Tenemos que $g[e'] = e^*$ y, como g fija a los elementos de e , se cumple que $g[e' \setminus e] = e^* \setminus e$, por lo que claramente podemos construir g^* de manera que $g^*|_{e' \cup e} = g|_{e' \cup e}$ y $g^* \in \text{Est}(e_1 \cup e_2)$.

La primera condición hace que $g^*(\rho') = g(\rho') = \rho^*$ y

$$g^*((p \wedge \|\rho' \in \tau_1\|_S) : (e' \cup e)) = g((p \wedge \|\rho' \in \tau_1\|_S) : (e' \cup e)),$$

pues g^* y g coinciden sobre los elementos de $\mathbb{B}_{e' \cup e}$, porque éstos son supremos de elementos de $\mathbb{P}_{e' \cup e}$, sobre los que g y g^* actúan igual. Esto significa que podemos sustituir g por g^* y suponer sin pérdida de generalidad que $g \in \text{Est}(e_1 \cup e_2)$. Entonces $g(\tau_1) = \tau_1$, $g(p) = p$ y

$$\begin{aligned} g((p \wedge \|\rho' \in \tau_1\|_S) : (e' \cup e)) &= g((p \wedge \|\rho' \in \tau_1\|_S)) : g[e' \cup e] \\ &= (p \wedge \|\rho^* \in \tau_1\|) : (e^* \cup e). \end{aligned}$$

La primera igualdad se cumple porque g es un isomorfismo en \mathbb{B} que restringido a \mathbb{P} cumple $g(p : (e \cup e')) = g(p) : g[e \cup e']$.

En definitiva, tenemos bien definida una aplicación τ sobre $SM^{\mathbb{B}} \cap V_{\text{rang } \tau_1}$, tal que si $\rho \in \mathcal{D}\tau$ y $\rho = f(\rho^*)$ con $f \in \text{Est}(e)$ y $\text{sop}(\rho^*) \cap (e_1 \cup e_2) \subset e$, entonces, para todo $g \in \text{Est}(e)$, se cumple que

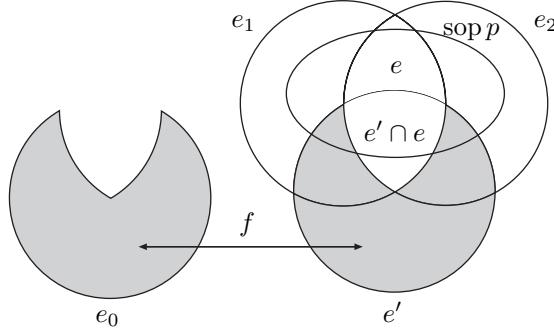
$$\tau(g(\rho)) = \tau((f \circ g)(\rho^*)) = g(f((p \wedge \|\rho^* \in \tau_1\|_S) : (e^* \cup e))) = g(\tau(\rho)).$$

Por lo tanto, $g(\tau) = \tau$, luego $\tau \in SM^{\mathbb{B}}$ y $\text{sop } \tau \subset e$.

Falta probar que $p \Vdash_S \tau_1 = \tau$. Para ello basta ver que si un nombre $\rho \in SM^{\mathbb{B}}$ cumple $\text{rang } \rho < \text{rang } \tau_1$ entonces²

$$p \wedge \|\rho \in \tau_1\|_S = p \wedge \tau(\rho).$$

Sea $e' = \text{sop } \rho$ y tomemos $e_0 \subset \omega$ equipotente con $e' \setminus e$ y disjunto con $e_1 \cup e_2 \cup e'$, sea $e^* = e_0 \cup (e' \cap e)$ y sea $f \in \text{Est}(e \cup ((e_1 \cup e_2) \setminus e'))$ una permutación que intercambie los elementos de e_0 con los de $e' \setminus e$ (de modo que $f^{-1} = f$ y $f[e^*] = e'$). Sea $\rho^* = f(\rho)$ (con lo que también $\rho = f(\rho^*)$). Así $f[e'] \cap (e_1 \cup e_2) \subset e$ y, por definición, $\tau(\rho) = f((p \wedge \|\rho^* \in \tau_1\|_S) : (e^* \cup e))$.



Lo que hemos de probar es que

$$p \wedge \|\rho \in \tau_1\|_S = p \wedge ((f(p) \wedge \|\rho \in f(\tau_1)\|_S) : (e' \cup e)).$$

Para probar la desigualdad \leq , tomamos $t \in \mathbb{P}$ tal que $t \leq p \wedge \|\rho \in \tau_1\|_S$, y basta probar que t extiende también al miembro derecho de la igualdad anterior.

Como $t \leq p$, se cumple que $t \Vdash_S \rho \in \tau_2$, luego por 7.9

$$t : (e' \cup e_2) \Vdash_S \rho \in \tau_2,$$

luego $(p \cup (t : (e' \cup e_2))) \Vdash_S \rho \in \tau_1$, y de nuevo por 7.9 pasamos a

$$(p \cup (t : (e' \cup e_2))) : (e' \cup e_1) \Vdash_S \rho \in \tau_1,$$

de donde

$$p \cup (t : ((e' \cup e_2) \cap (e' \cup e_1))) \Vdash_S \rho \in \tau_1,$$

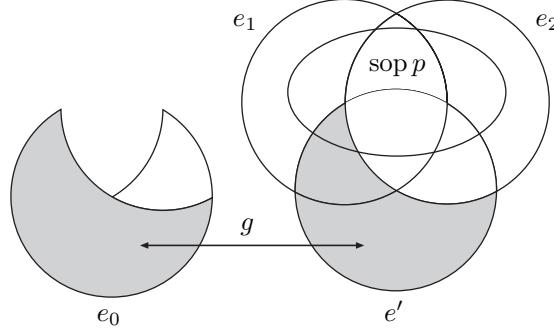
²Aceptando esto, sea G un filtro genérico tal que $p \in G$. Entonces si $x \in \tau_{1G}$ es porque $x = \rho_G$, con $\rho \in \mathcal{D}\tau_1$ y $\|\rho \in \tau_1\|_S \in G$, luego $\tau(\rho) \in G$, luego $x = \rho_G \in \tau_G$. El recíproco se prueba igualmente, luego $\tau_{1G} = \tau_G$.

pues esta condición extiende a la anterior, y esto es lo mismo que

$$q = p \cup (t : (e' \cup e)) \Vdash_S \rho \in \tau_1.$$

Observemos que $\text{sop}(q \setminus p) \subset e' \cup e$, y esto hace que $\neg f(p) \perp q$.

Podemos tomar $g \in \text{Est}(e_2)$ tal que $g|_{e_1} = f|_{e_1}$. Entonces $g(\tau_1) = f(\tau_1)$, $g(\tau_2) = \tau_2$ y $g(p) \subset f(p) \cup p$.



Como $p \Vdash_S \tau_1 = \tau_2$ se cumple que $g(p) \Vdash_S g(\tau_1) = \tau_2$, luego

$$f(p) \cup p \Vdash_S (\tau_1 = \tau_2 \wedge g(\tau_1) = \tau_2)$$

y, a su vez, $f(p) \cup p \Vdash_S f(\tau_1) = \tau_1$. Definimos

$$r = q \cup f(p) \leq p \cup f(p) \Vdash_S \tau_1 = f(\tau_1),$$

y como $r \leq q \Vdash_S \rho \in \tau_1$, también $r \Vdash_S \rho \in f(\tau_1)$. Por 7.9, de hecho

$$r : (e' \cup f[e_1]) \Vdash_S \rho \in f(\tau_1),$$

y así $r' = f(p) \cup r : (e' \cup f[e_1]) \leq f(p) \wedge \|\rho \in f(\tau_1)\|_S$. Por último:

$$t \leq p \cup t : (e' \cup e) = p \cup r' : (e' \cup e) \leq p \wedge (f(p) \wedge \|\rho \in f(\tau_1)\|_S) : (e' \cup e),$$

pues, teniendo en cuenta que $e' \cup e \subset e' \cup f[e_1]$, por una parte

$$t : (e' \cup e) \leq q : (e' \cup e) \leq r : (e' \cup e) \leq r' : (e' \cup e)$$

y recíprocamente:

$$r' : (e' \cup e) = r : (e' \cup e) = (q \cup f(p)) : (e' \cup e) \subset p \cup t : (e' \cup e).$$

Esto termina la prueba de la desigualdad

$$p \wedge \|\rho \in \tau_1\|_S \leq p \wedge ((f(p) \wedge \|\rho \in f(\tau_1)\|_S) : (e' \cup e)).$$

Para probar la desigualdad opuesta basta tomar una condición $t \in \mathbb{P}$ tal que $t \leq f(p) \wedge \|\rho \in f(\tau_1)\|_S$ y demostrar que $p \wedge t : (e' \cup e) \leq \|\rho \in \tau_1\|_S$.

Tenemos que $t \Vdash_S \rho \in f(\tau_1)$ y, como $t \leq f(p) \Vdash_S f(\tau_1) = f(\tau_2)$, también $t \Vdash_S \rho \in f(\tau_2)$. Por 7.9 esto implica que $t : (e' \cup f[e_2]) \Vdash_S \rho \in f(\tau_2)$, luego $f(p) \cup t : (e' \cup f[e_2]) \Vdash_S \rho \in f(\tau_1)$. Aplicando de nuevo 7.9

$$(f(p) \cup t : (e' \cup f[e_2])) : (e' \cup f[e_1]) \Vdash_S \rho \in f(\tau_1),$$

de donde

$$f(p) \cup (t : (e' \cup e)) \Vdash_S \rho \in f(\tau_1).$$

Si no se cumpliera que $p \wedge t : (e' \cup e) \leq \|\rho \in \tau_1\|_S$, existiría $\bar{t} \in \mathbb{P}$ tal que

$$\bar{t} \leq p \wedge t : (e' \cup e), \quad \bar{t} \Vdash_S \rho \notin f(\tau_1).$$

Ahora, partiendo de $\bar{t} \leq p$ y $\bar{t} \Vdash_S \rho \notin f(\tau_1)$, aplicamos exactamente el mismo razonamiento que hemos empleado en la prueba de la desigualdad opuesta cambiando sistemáticamente $\|\rho \in -\|_S$ por $\|\rho \notin -\|_S$, y la conclusión es que

$$r = p \cup f(p) \cup \bar{t} : (e' \cup e) \Vdash_S \rho \notin f(\tau_1),$$

pero $r \leq f(p) \cup t : (e' \cup e) \Vdash_S \rho \in f(\tau_1)$, contradicción. ■

Esto nos permite definir el soporte de un conjunto de N . Ahora bien, como la numeración de los nombres $\{\sigma_i\}_{i \in \omega}$ está en M , pero la enumeración de los conjuntos genéricos $\{s_i\}_{i \in \omega}$ no está en N , para que se pueda hablar de soportes desde N necesitamos definirlos como subconjuntos de A y no de ω :

Definición 7.11 Si $x \in N$, diremos que $E \subset A$ finito es un *soporte* de x existe $e \subset \omega$ finito tal que $E = \{s_i \mid i \in e\}$ y $x = \tau_G$, para un cierto $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$ tal que $\text{sop } \tau \subset e$.

Del teorema anterior se sigue que la intersección de dos soportes de un conjunto x es también un soporte de x . En efecto, si E_1 y E_2 son soportes de x , esto significa que $x = \tau_{1G} = \tau_{2G}$, con $\text{sop } \tau_j \subset e_j$ y $E_j = \{s_i \mid i \in e_j\}$, para $j = 1, 2$.

Entonces existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash_S \tau_1 = \tau_2$, luego por el teorema anterior existe un $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$ tal que $p \Vdash_S \tau_1 = \tau$ y $\text{sop } \tau \subset e_1 \cap e_2$, pero entonces $x = \tau_G$, luego $E_1 \cap E_2$ es un soporte de x .

Por lo tanto, para cada $x \in N$, podemos definir su *soporte* $\text{sop } x$ como el menor soporte de x .

Si observamos la construcción de τ en la prueba del teorema anterior vemos que si x admite un nombre τ_1 de rango menor que un límite λ , entonces τ tiene también rango menor que λ . Esto se traduce en que si $x \in N$ admite un soporte determinado por un nombre de rango menor que λ , entonces su soporte mínimo está determinado por un nombre de rango menor que λ , por lo que no es necesario considerar nombres de rangos mayores para encontrarlo.

Teorema 7.12 Si $X \in N$, la aplicación $\text{sop}_X : X \longrightarrow \mathcal{P}^f A$ que a cada $x \in X$ le asigna su soporte está en N .

DEMOSTRACIÓN: Para cada $e \subset \omega$ finito, sea $\tilde{E} = \{(\sigma_i, \mathbb{1}) \mid i \in e\} \in SM^{\mathbb{P}}$. Sea $\lambda < \Omega^M$ un ordinal límite tal que todo elemento de X admite un nombre de rango menor que λ . Sea

$$\delta^\lambda = \{(\text{p.o.}(\rho, \tilde{E}), \mathbb{1}) \mid \rho \in SV^{\mathbb{B}} \cap V_\lambda \wedge e \in \mathcal{P}^f \omega \wedge \text{sop } \rho \subset e\}^M.$$

Si $f \in \Sigma_\omega^M$, vemos que

$$(f(\text{p.o.}(\rho, \tilde{E})), f(\mathbb{1})) = (\text{p.o.}(f(\rho), \tilde{f}[e]), \mathbb{1}) \in \delta^\lambda,$$

luego $f(\delta) \subset \delta^\lambda$, y razonando con f^{-1} obtenemos la igualdad, luego $\delta^\lambda \in SM^{\mathbb{B}}$ (y tiene soporte vacío). Además $\delta_G^\lambda \cap (X \times \mathcal{P}^f A) \in N$ es la relación

$$\{(x, E) \in X \times \mathcal{P}^f A \mid E \text{ es un soporte de } x\}.$$

Como esta relación está en N , es claro que a partir de ella podemos definir la función del enunciado. ■

Nota Observemos que, dado cualquier $\tau \in SM^{\mathbb{B}}$, tomando $\lambda > \text{rang } \tau$, se cumple que

$$\rho_G \in \text{sop } \tau_G \leftrightarrow \bigwedge E \in \mathcal{P}^f A ((\tau_G, E) \in \delta_G^\lambda \rightarrow \rho_G \in E),$$

por lo que podemos definir

$$\|\rho \in \text{sop } \tau\|_S \equiv \|\bigwedge E \in \mathcal{P}^f \sigma ((\tau, E) \in \delta^\lambda \rightarrow \rho \in E)\|_S,$$

que es independiente de la elección de λ , y se cumple que

$$\|\rho \in \text{sop } \tau\|_S \in G \leftrightarrow \rho_G \in \text{sop } \tau_G.$$

A su vez, esto se traduce que el teorema fundamental sigue siendo válido para fórmulas que incluyan subfórmulas atómicas de tipo $\rho \in \text{sop } \tau$. Como en el caso de $\text{Val}(\rho, \tau)$, las expresiones $\|\phi\|_S$ para fórmulas que contienen subfórmulas atómicas de este tipo contienen un parámetro δ^λ que no hacemos explícito, pero como estos nombres tienen soporte vacío no son relevantes a la hora de aplicar automorfismos. ■

Conviene asignar nombres canónicos a los subconjuntos de A :

Definición 7.13 Si $e \subset \omega$ es finito, definimos

$$\tilde{e} = \{(\sigma_i, \mathbb{1}) \mid i \in e\} \in SM^{\mathbb{P}},$$

de modo que $\tilde{e}_G = \{s_i \mid i \in e\} \in N$.

Aunque nos proponemos demostrar que N cumple el teorema de los ultrafiltros, con lo que tenemos probado hasta aquí podemos demostrar un resultado más débil que, no obstante, ilustra el interés de los conceptos que hemos introducido:

Teorema 7.14 *En N todo conjunto puede ser totalmente ordenado.*

DEMOSTRACIÓN: Recordemos [TC 4.75] que $\mathcal{P}\omega$ puede ser totalmente ordenado, luego $A \subset \mathcal{P}\omega$ también (por un orden definible explícitamente en N).

Sea $X \in N$ y fijemos un ordinal límite λ tal que todo elemento de X tenga un nombre de rango menor que λ . Por el teorema anterior sabemos que la aplicación $\text{sop} : X \rightarrow \mathcal{P}^f A$ está en N . Dado $x \in X$, consideramos

$$\text{sop } x = E^x = \{t_0^x, \dots, t_{n-1}^x\},$$

donde la enumeración puede tomarse en N y podemos elegirla concretamente como la única que es creciente respecto al orden de A . Con esto tenemos definida una asignación t^x , de modo que la aplicación $x \mapsto t^x$ está en N .

Ahora observamos que existe un $\rho \in SM^\mathbb{B} \cap V_\lambda$ tal que $\text{Val}_\lambda(\rho, t^x) = x$.

En efecto, sea $\pi : n \rightarrow \omega$ la aplicación que determina t^x , es decir, tal que $t_i^x = s_{\pi i}$. Por definición de soporte de un conjunto, $e = \pi[n]$ es el soporte de un nombre de x , es decir, que $x = \rho_{0G}$, con $\rho_0 \in SM^\mathbb{B} \cap V_\lambda$ y $\text{sop } \rho_0 = e$.

Sea $f \in \Sigma_\omega^M$ tal que $f|_n = \pi$ y sea $\rho = f^{-1}(\rho_0)$. Entonces

$$\text{Val}_\lambda(\rho, t^x) = f(f^{-1}(\rho_0))_G = \rho_{0G} = x.$$

Notemos que π no puede calcularse en N a partir de x , pero no importa. Lo cierto es que existe un $\rho \in SM^\mathbb{B}$ tal que $\text{Val}_\lambda(\rho, t^x) = x$ y teniendo en cuenta que $SM^\mathbb{B} \subset M = L^N$, en N podemos definir la aplicación $F : X \rightarrow L$ que a cada $x \in X$ le asigna el menor nombre ρ (respecto al orden constructible) tal que $\text{Val}_\lambda(\rho, t^x) = x$.

Por último, la aplicación $S : X \rightarrow \mathcal{P}A \times L$ dada por $S(x) = (\text{sop } x, F(x))$ es inyectiva, pues a partir de $\text{sop } x$ se determina t^x y a partir de t^x y $F(x)$ se determina x .

Como $\mathcal{P}A$ y L pueden ser totalmente ordenados en N , el orden lexicográfico determina a través de S un orden total en X . ■

Así pues, a partir de que todo conjunto puede ser totalmente ordenado no puede probarse que todo conjunto puede ser bien ordenado.

Terminamos esta sección con algunos resultados adicionales que vamos a necesitar.

Definición 7.15 Si $E \subset A$ es finito, definimos $N_E = \{x \in N \mid \text{sop } x \subset E\}$. Este conjunto es una clase en $M[G]$ (es decir, es definible mediante una fórmula relativizada a $M[G]$) y es localmente definible en N , en el sentido de que si $X \in N$ entonces

$$X_E = N_E \cap X = \{x \in X \mid \text{sop}_X(x) \subset E\} \in N.$$

Más aún, según hemos visto en la prueba del teorema anterior, en N podemos definir una aplicación inyectiva $S|_{X_E} : X_E \rightarrow \mathcal{P}E \times L$. Es fácil ver que, de hecho, la prueba se puede modificar ligeramente para obtener una aplicación inyectiva $X_E \rightarrow L$ o, alternativamente, podemos obtenerla a partir de $S|_{X_E}$ biyectando $\mathcal{P}E$ con su cardinal (finito). En cualquier caso, la conclusión es que X_E es bien ordenable en N .

Teorema 7.16 *Si $E \subset A$ es finito, entonces $\mathcal{P}^f N_E \subset N_E$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $E = \{s_i \mid i \in e\}$ y tomemos $x \subset N_E$ finito. Cada $u \in x$ es de la forma $(\tau_u)_G$, para cierto $\tau_u \in SM^\mathbb{B}$ tal que $\text{sop } \tau_u \subset e$. Entonces $x = \tau_G$, donde $\tau = \{(\tau_u, \mathbf{1}) \mid u \in x\} \in SM^\mathbb{B}$ y $\text{sop } \tau \subset e$. (Notemos que $\tau \in M$ porque x es finito.) Por lo tanto $x \in N_E$. ■

Más aún, todo conjunto definible a partir de parámetros en N_E está en N_E :

Teorema 7.17 *Si $E \subset A$ es finito, $x_1, \dots, x_n \in N_E$ y $x \in N$ cumple*

$$\bigwedge y \in N (\phi^N(y, x_1, \dots, x_n) \leftrightarrow y = x),$$

entonces $y \in N_E$.

DEMOSTRACIÓN: Pongamos que $E = \{s_i \mid i \in e\}$, con $e \subset \omega$, de modo que $x_k = \tau_{kG}$ con $\tau_k \in SM^\mathbb{B}$ y $\text{sop}(\tau_k) \subset e$. Sea $\text{sop } x = E' = \{s_i \mid i \in e'\}$ y sea $x = \tau_G$, donde $\text{sop } \tau = e'$. Entonces existe un $p \in \mathbb{P}$ tal que

$$p \Vdash_S \bigvee^1 x \phi(x, \tau_1, \dots, \tau_n) \wedge \phi(\tau, \tau_1, \dots, \tau_n) \wedge \text{sop } \tau = \tilde{e}',$$

y podemos tomarlo de hecho tal que $p \in \mathbb{P}_{e \cup e'}$. Sea ahora $f \in \text{Est}(e)$ tal que $f[e'] \cap e' \subset e$. Entonces

$$f(p) \Vdash_S \bigvee^1 x \phi(x, \tau_1, \dots, \tau_n) \wedge \phi(f(\tau), \tau_1, \dots, \tau_n) \wedge \text{sop } f(\tau) = \widetilde{f[e']},$$

pero claramente $f(p)$ es compatible con p , luego podemos tomar $r \in \mathbb{P}$ tal que $r \leq p \wedge r \leq f(p)$. Entonces

$$r \Vdash_S \bigvee^1 x \phi(x) \wedge \phi(\tau) \wedge \phi(f(\tau)),$$

luego $r \Vdash_S \tau = f(\tau) \wedge \text{sop } \tau = \tilde{e}' \wedge \text{sop } f(\tau) = \widetilde{f[e']}$, luego $r \Vdash_S \tilde{e}' = \widetilde{f[e']}$, pero esto sólo es posible si $e' = f[e']$, con lo que $e' \subset e$ y $E' \subset E$, luego $x \in N_E$. ■

En particular, X_E puede definirse en N a partir de X , E y de la relación “ E es un soporte de x ”, que tiene soporte vacío, luego si $X \in N_E$, entonces $X_E \in N_E$.

7.2 TU no implica AE

Pasamos ya a demostrar que el modelo N que hemos estudiado en la sección precedente cumple el teorema de los ideales primos (luego también el teorema de los ultrafiltros, que es equivalente). Necesitamos un resultado previo.

Para cada $q \in \omega^{<\omega}$ sea $A_q = \{s \in A \mid \chi_s|_{\ell(q)} = q\} \in N$. Notemos que $A_q \neq \emptyset$, pues el conjunto

$$D = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall i \in \omega \ \{i\} \times q \subset p\} \in M$$

es denso en \mathbb{P} , luego corta al filtro genérico G . Como cada q admite infinitas prolongaciones, de hecho A_q es infinito.

Observemos también que $\text{sop } A_q = \emptyset$, pues $A_q = (\tau_q)_G$, donde

$$\tau_q = \{(\sigma_i, p) \mid i \in \omega \wedge p \in \mathbb{P} \wedge \{i\} \times q \subset p\} \in SM^{\mathbb{P}}$$

tiene soporte vacío.

Teorema 7.18 Sean $E \subset A$ un conjunto finito, sean $x_1, \dots, x_n \in N_E$, sea $m \in \omega$, sea $\{a_k\}_{k < m}$ una sucesión de elementos de $A \setminus E$ distintos dos a dos de modo que se cumpla una fórmula

$$\phi^N(x_1, \dots, x_n, \{a_k\}_{k < m}).$$

Entonces existe una sucesión $\{q_k\}_{k < m}$ de elementos de $\omega^{<\omega}$ tales que los conjuntos A_{q_k} son disjuntos dos a dos y disjuntos de E , $a_k \in A_{q_k}$ y si una sucesión $\{b_k\}_{k < m}$ cumple $b_k \in A_{q_k}$, entonces también $\phi^N(x_1, \dots, x_n, \{b_k\}_{k < m})$.

DEMOSTRACIÓN: Sea $E = \{s_i \mid i \in e\}$, con $e \subset \omega$, sea $s : e \longrightarrow E$ la asignación dada por $s(i) = s_i$, sea τ su nombre canónico, de modo que $\text{sop } \tau = e$, sea ρ_i un nombre de soporte contenido en e tal que $\rho_{iG} = s_i$ y, por consiguiente, $x_i = \text{Val}(\rho_i, s)$, sea $\{i_k\}_{k < m}$ tal que $a_k = s_{i_k}$, sea

$$\pi = \{(\text{p.o.}(\check{k}, \sigma_{i_k}), \mathbb{1}) \mid k < m\} \in SM^{\mathbb{B}},$$

de modo que $\pi_G = \{a_k\}_{k < m}$, y sea $p \in G$ tal que

$$p \Vdash_S \phi(\text{Val}(\rho_1, \tau), \dots, \text{Val}(\rho_n, \tau), \pi).$$

Tomemos $K \in \omega$ tal que los $\chi_{a_k}|_K$ y los $\chi_{s_i}|_K$ con $i \in e$ sean distintos dos a dos y $\mathcal{D}p \subset \omega \times K$. Veamos que tomando $q_k = \chi_{a_k}|_K$ se cumple lo pedido.

Ciertamente los conjuntos A_{q_i} son disjuntos dos a dos y disjuntos de E . Tomemos $b_k \in A_{q_k}$, digamos que $b_k = s_{j_k}$. Como $s_{j_k}|_K = s_{i_k}|_K \neq s_{i_{k'}}|_K$, para todo $k' \neq k$, vemos que $j_k \neq i_{k'}$, luego los conjuntos $\{i_k, j_k\}$ son disjuntos dos a dos y disjuntos de e , y podemos definir $h \in \text{Est}(e)$ tal que $h(i_k) = j_k$, $h(j_k) = i_k$ y $h(u) = u$ para todo $u \in \omega$ distinto de un i_k o un j_k .

Esto implica que $h(p) \in G$. En efecto, tenemos que

$$h(p) = \{(h(u), n, r) \mid (u, n, r) \in p\}.$$

Sea $(u, n, r) \in p$. Si $u = i_k$, entonces $n < K$ y

$$f_G(h(u), n) = f_G(j_k, n) = s_{j_k}|_K(n) = s_{i_k}|_K(n) = f_G(u, n) = r,$$

e igualmente si $u = j_k$, y trivialmente si u es distinto de todos los i_k y j_k . Por lo tanto $h(p) \subset f_G$ y esto implica que $h(p) \in G$. Como

$$h(p) \Vdash_S \phi(\text{Val}(\rho_1, \tau), \dots, \text{Val}(\rho_n, \tau), h(\pi)),$$

y claramente $h(\pi) = \{\text{(p.o. }(\check{k}, \sigma_{j_k}), \mathbf{1}) \mid k < m\}$, con lo que $h(\pi)_G = \{b_k\}_{k < m}$, luego concluimos que se cumple $\phi^N(x_1, \dots, x_n, \{b_k\}_{k < m})$. ■

En definitiva, si unos conjuntos genéricos a_k cumplen una determinada propiedad, podemos reemplazarlos por otros conjuntos genéricos cualesquiera que no alteren $\chi_{a_k}|_K$ para K suficientemente grande y se sigue cumpliendo la misma propiedad.

Teorema 7.19 *N cumple el teorema de los ideales primos.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\mathbb{C} = (C, \wedge, \vee')$ un álgebra de Boole. Sea $E \subset A$ finito tal que $\text{sop } \mathbb{C} \subset E$, es decir, tal que $\mathbb{C} \in N_E$. Entonces por 7.17 tenemos también que $C, \wedge, \vee, ', \emptyset, \mathbf{1} \in N_E$. A partir de aquí seguiremos el convenio usual de no distinguir entre \mathbb{C} y C .

Tomemos ahora un ordinal límite $\mu < \Omega^M$ suficientemente grande como para que $(\mathcal{PC})^N \in X = V_\mu^N$. De nuevo por 7.17 tenemos que $(\mathcal{PC})^N \in X_N$.

Sea $S = \{I \in X_E \mid I \text{ es un ideal de } \mathbb{C}\} \in N$. Obviamente $\{\emptyset\} \in S \neq \emptyset$. Como X_E puede ser bien ordenado en N , tenemos que S tiene una función de elección en N , y esto basta para demostrar que S tiene un elemento maximal.

En efecto, razonando en N , podemos definir por recurrencia $F(0) = \{\emptyset\}$ y, supuesto definido $F(\delta) \in S$, definimos $F(\delta + 1)$ como el mínimo elemento de S que contiene estrictamente a $F(\delta)$ si existe tal ideal y $F(\delta + 1) = F(\delta)$ en caso contrario. Finalmente $F(\lambda) = \bigcup_{\delta < \lambda} F(\delta)$.

La última parte requiere comprobar que $F(\lambda) \in S$. Ciertamente es un ideal de \mathbb{B} , porque es una unión de una cadena de ideales. También es obvio que $F(\lambda) \in V_\mu$. Por último basta observar que $F(\lambda)$ es el único conjunto $x \in N$ que cumple una definición $\phi^N(x, X_E, \lambda)$. (La fórmula afirma que existe una función $F : \lambda + 1 \rightarrow X$ tal que $F(\lambda) = x \wedge F(0) = \{\emptyset\}$, etc.). Entonces 7.17 nos da que $F(\lambda) \in X_E$, luego $F(\lambda) \in S$.

Como no podemos acabar con una función $F : \Omega \rightarrow S$ inyectiva, la sucesión tiene que estabilizarse, y el ideal en que lo haga será maximal en S .

A partir de aquí fijamos un ideal I de \mathbb{C} maximal en S , es decir, maximal entre los ideales de \mathbb{C} con soporte contenido en E . Vamos a probar que I es un ideal primo de \mathbb{C} . En caso contrario existe $x \in \mathbb{C}$ tal que $x \notin I$ y $x' \notin I$.

Sea $E' \subset A$ finito tal que $\text{sop } x \subset E'$. Podemos suponer que $E \subset E'$. No puede darse la igualdad, pues en tal caso el ideal generado por $I \cup \{x\}$ estaría en S y contradiría la maximalidad de I .

Sea $E = \{s_i \mid i \in e\}$ y sea $E' = E \cup \{s_i \mid i \in e'\}$, donde $e \cap e' = \emptyset$. Sean $s : e \longrightarrow E$ y $s' : e' \longrightarrow E' \setminus E$ las asignaciones dadas por $s(i) = s_i$ y sea $x = \tau_G$, con $\text{sop } \tau \subset e \cup e'$, de modo que $x = \text{Val}(\tau, s \cup s')$. Sea $d : A^{e'} \longrightarrow N$ la aplicación dada por $d(t) = \text{Val}(\tau, s \cup t)$. Así $d(s') = x$, con lo que

$$d(s') \in \mathbb{C} \wedge d(s') \notin I \wedge d(s')' \notin I.$$

Observemos que en esta fórmula (cambiando d por su definición), todos los parámetros que intervienen (aparte de s') están en N_E , pues son τ ($= \tau_G$, que tiene soporte \emptyset), s , I y \mathbb{C} (y las operaciones de \mathbb{C}). Componiendo s' con una enumeración de e' podemos aplicar el teorema 7.18, que nos da una aplicación $q^0 : e' \longrightarrow \omega^{<\omega}$ de modo que los conjuntos $\{A_{q_i^0}\}_{i \in e'}$ son disjuntos dos a dos y disjuntos de E , además $s'_i \in A_{q_i^0}$ y si $t \in \prod_{i \in e'} A_{q_i^0}$, entonces

$$d(t) \in \mathbb{C} \setminus I \wedge d(t)' \in \mathbb{C} \setminus I.$$

Definimos $S_i^0 = \{q_i^0\}$, para $i \in e'$. Éste es el primer paso de la construcción de una sucesión de sucesiones finitas $\{S_i^m\}_{i \in e'}$, para $m < \omega$, de modo que se cumplan las propiedades siguientes:

- a) S_i^m es un subconjunto finito de $\omega^{<\omega}$ formado por elementos incompatibles entre sí, es decir, tales que los conjuntos A_q con $q \in S_i^m$ son disjuntos dos a dos.
- b) Cada elemento de S_i^{m+1} extiende a un elemento de S_i^m y todo elemento de S_i^m tiene al menos una extensión a S_i^{m+1} . Equivalentemente, para cada $q \in S_i^{m+1}$, el conjunto A_q está contenido en un A_r , para un $r \in S_i^m$ y cada A_r contiene un A_q .
- c) Si $r \in \prod_{i \in e'} S_i^m$ y $F \subset A$ es un conjunto finito que contiene exactamente un elemento de cada elemento de $\bigcup_{i \in e'} \{A_q \mid q \in S_i^{m+1}\}$, entonces³

$$\bigwedge \{d(t) \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F)\} \in I, \quad \bigwedge \{d(t)' \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F)\} \in I.$$

Observemos que $\{S_i^0\}_{i \in e'}$ cumple la propiedad a), que es la única que no involucra términos de la sucesión correspondientes a valores $m > 0$. Supongamos definidas las sucesiones $\{S_i^m\}_{i \in e'}$ para $m \leq n$ de modo que se cumplan las propiedades anteriores. En particular, todos los A_q con $q \in S_i^m$ están contenidos en $A_{q_i^0}$. Por lo tanto, si $r \in \prod_{i \in e'} S_i^n$, entonces $\prod_{i \in e'} A_{r_i} \subset \prod_{i \in e'} A_{q_i^0}$. Por lo tanto:

$$\bigwedge r \in \prod_{i \in e'} S_i^n \bigwedge t \in \prod_{i \in e'} A_{r_i} (d(t) \in \mathbb{C} \setminus I \wedge d(t)' \in \mathbb{C} \setminus I).$$

³Observemos que $A_{r_i} \cap F = \bigcup_{q \in S_i^{m+1}} (A_q \cap F)$, donde cada $A_q \cap F$ tiene un único elemento.

Sea J el ideal (no necesariamente propio) generado por

$$C = I \cup \{d(t) \mid t \in \prod_{i \in e'} A_{r_i}\},$$

es decir,

$$J = \{b \in \mathbb{C} \mid \bigvee Y \in \mathcal{P}^f C \ b \leq \bigvee Y\}.$$

Observemos que $J \in N_E$, pues cada $A_{r_i} \in N_E$ (porque tiene soporte vacío), luego $\{A_{r_i}\}_{i \in e'} \in N_E$ (aplicando varias veces 7.16), luego $C \in N_E$ (pues se define a partir de I , \mathbb{C} , τ , $s \in N_E$ y de $\{A_{r_i}\}_{i \in e'}$ (y las operaciones de \mathbb{C}), luego $J \in N_E$ (pues se define a partir de \mathbb{C} y C (y las operaciones de \mathbb{C}).

Por lo tanto, $J \in X_E$ y contiene estrictamente a I , luego no puede ser un ideal (propio) de \mathbb{C} , ya que entonces sería $J \in S$ en contradicción con la maximalidad de I . Concluimos, pues, que $J = \mathbb{C}$.

Consecuentemente, existe $F_1''(r) \subset \prod_{i \in e'} A_{r_i}$ finito y $u \in I$ tales que

$$\mathbb{1} = u \vee \bigvee_{t \in F_1''(r)} d(t),$$

de donde $\bigwedge_{t \in F_1''(r)} d(t)' = u \wedge \bigwedge_{t \in F_1''(r)} d(t)' \in I$. Razonando análogamente con el ideal generado por

$$C' = I \cup \{d(t)' \mid t \in \prod_{i \in e'} A_{r_i}\}$$

obtenemos un conjunto finito $F_2''(r) \subset \prod_{i \in e'} A_{r_i}$ tal que $\bigwedge_{t \in F_2''(r)} d(t) \in I$. Sea $F_j'(r) = \bigcup_{t \in F_j''(r)} \mathcal{R}t \subset A$, para $j = 1, 2$ y sea

$$F' = \bigcup \{F_1'(r) \cup F_2'(r) \mid r \in \prod_{i \in e'} S_i^n\} \subset \bigcup_{i \in e'} \bigcup_{q \in S_i^n} A_q.$$

Así, para $j = 1, 2$, $F_j''(r) \subset \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F')$. Consecuentemente,

$$\bigwedge r \in \prod_{i \in e'} S_i^n (\bigwedge \{d(t)' \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F')\} \in I \wedge \bigwedge \{d(t) \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F')\} \in I).$$

Esta propiedad de F' se conserva si le añadimos elementos, luego podemos suponer que F' contiene al menos un elemento de cada A_q , con $q \in S_i^n$, $i \in e'$. Todos los parámetros que aparecen en la fórmula anterior (salvo F') están en N_E (el único que no había aparecido antes es $\prod_{i \in e'} S_i^n \in M \subset N_E$). Por lo tanto, podemos aplicar el teorema 7.18 a una enumeración de F' para concluir que existe una sucesión $\{q_k\}_{k < l}$ de elementos de $\omega^{<\omega}$ de modo que los conjuntos A_{q_k} son disjuntos dos a dos y F' consta exactamente de un elemento de cada uno de ellos, y si $F \subset A$ contiene exactamente un elemento de cada A_{q_k} , entonces

$$\bigwedge r \in \prod_{i \in e'} S_i^n (\bigwedge \{d(t)' \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F)\} \in I \wedge \bigwedge \{d(t) \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F)\} \in I).$$

Más aún cada $s \in F'$ está en un único A_q con $q \in S_i^n$, para cierto i , y en la prueba de 7.18 se ve que podemos tomar el correspondiente q_k de longitud arbitrariamente grande, de modo que $q \subset q_k$ o, lo que es lo mismo, $A_{q_k} \subset A_q$. Definimos

$$S_i^{n+1} = \{q_k \mid k < l \wedge \forall q \in S_i^n \ q \subset q_k\}.$$

Así, por construcción, $\bigcup_{i \in e'} S_i^{n+1} = \{q_k \mid k < l\}$, cada $q' \in S_i^{n+1}$ extiende a un $q \in S_i^n$ y cada q tiene al menos una extensión q' . Con esto tenemos asegurado que $\{S_i^{n+1}\}_{i \in e'}$ cumple las propiedades a), b), c).

En la construcción de $\{S_i^{n+1}\}_{i \in e'}$ hemos hecho algunas elecciones (finitas) arbitrarias, por lo que en principio no tenemos garantizado que la sucesión completa $\{\{S_i^m\}_{i \in e'}\}_{m \in \omega}$ esté en N . Ahora, bien, hemos probado, por inducción, que para cada n existe una sucesión finita $\{\{S_i^m\}_{i \in e'}\}_{m \leq n}$ que cumple las propiedades a), b), c), y como cada $\{S_i^m\}_{i \in e'} \in M = L^N$ (porque M es cerrado para subconjuntos finitos), podemos redefinir la sucesión completa partiendo de la sucesión $\{S_i^0\}_{i < e'}$ que hemos fijado y tomando como $\{S_i^{n+1}\}_{i \in e'}$ la menor sucesión respecto del orden constructible que hace que se cumplan las propiedades a), b), c) para $n + 1$ supuesto que se cumplen para n . Así sí que podemos concluir que la construcción puede realizarse en N .

Ahora definimos $T_i = \bigcup_{m \in \omega} S_i^m$, que claramente es un árbol con la inclusión, tiene altura ω , su nivel m -simo es S_i^m , tiene un único tallo q_i^0 y cada nodo de altura m tiene al menos otro nodo por encima.

En este punto tenemos que interrumpir la prueba para enunciar un resultado auxiliar que demostraremos en la sección 7.4:

Definición 7.20 Si T es un ω -árbol (un árbol de altura ω con niveles finitos), diremos que un conjunto $A \subset T$ *domina* a otro conjunto $B \subset T$ si todo elemento de B está por debajo de un elemento de A .

Representaremos $T|_n = \{x \in T \mid \text{alt } x \leq n\}$.

Si $m \in \omega$, diremos que A es m -dominante si existe un $x \in T$ de altura m tal que A domina el conjunto $\{y \in \text{Niv}_{m+1}(T) \mid x \leq y\}$.

Si $\{T_i\}_{i < k}$ es una familia de ω -árboles, un *producto m-dominante* es un conjunto de la forma $\prod_{i < k} D_i$, donde cada D_i es m -dominante en T_i .

Teorema 7.21 (Halpern-Läuchli) Si $\{T_i\}_{i < k}$ es una familia de ω -árboles sin nodos maximales, existe un $n \in \omega$ tal que si

$$\prod_{i < k} T_i|_n = Q_1 \cup Q_2, \quad Q_1 \cap Q_2 = \emptyset,$$

entonces uno de los conjuntos Q_1 o Q_2 contiene un producto m -dominante, para un $m < n$.

CONTINUACIÓN DE LA DEMOSTRACIÓN DE 7.19: Sea $n \in \omega$ según el teorema anterior aplicado a los árboles $\{T_i\}_{i \in e'}$. Sea H una función de elección sobre

$$W = \bigcup_{i \in e'} \bigcup_{m \leq n} \{A_q \mid q \in S_i^n\}.$$

Sea $y_i = \{H(A_q) \mid q \in \bigcup_{m \leq n} S_i^m\} \subset A$, sea $P = \prod_{i \in e} y_i$. Vamos a probar que si $z \subset P$ entonces

$$\bigwedge_{t \in z} d(t) \in I \quad \text{o} \quad \bigwedge_{t \in P \setminus z} d(t)' \in I.$$

Admitiendo esto, la conclusión es ya sencilla, pues

$$\mathbb{1} = \bigwedge_{t \in P} (d(t) \vee d(t)') = \bigvee_{f \in 2^P} \bigwedge_{t \in P} d(t)^{(f(t))},$$

donde, para cada $b \in \mathbb{B}$, representamos $b^{(1)} = b$ y $b^{(0)} = b'$. Definimos

$$z_f = \{t \in P \mid f(z) = 1\},$$

y así llegamos a una contradicción:

$$\mathbb{1} = \bigvee_{f \in 2^P} \left(\bigwedge_{t \in z_f} d(t) \wedge \bigwedge_{t \in P \setminus z_f} d(t)' \right) \in I.$$

Fijamos, pues $z \subset P$ y definimos

$$Q_1 = \{g \in \prod_{i \in e'} T_i|_n \mid \{H(A_{g_i})\}_{i \in e'} \in z\}, \quad Q_2 = \prod_{i \in e'} T_i|_n \setminus Q_1.$$

Por el teorema de Halpern-Läuchli o bien Q_1 o bien Q_2 contiene un producto m -dominante, $V = \prod_{i \in e'} D_i$ para cierto $m < n$. Esto significa que existe $r_i \in S_i^m$ tal que para todo $q \in S_i^{m+1}$ que extienda a r_i existe un $q' \in D_i$ que extiende a q .

Definimos $f : \bigcup_{i \in e'} S_i^{m+1} \longrightarrow A$ del modo siguiente: si $q \in S_i^{m+1}$ extiende a r_i , entonces $f(q) = H(A_{q'})$, donde $q' \in D_i$ es el elemento que extiende a q . En caso contrario $f(q)$ es cualquier elemento de A_q . Notemos que en ambos casos $f(q) \in A_q$.

Sea $F = \{f(q) \mid q \in \bigcup_{i \in e'} S_i^{m+1}\}$. Así F contiene exactamente un elemento de cada elemento de $\bigcup_{i \in e'} \{A_q \mid q \in S_i^{m+1}\}$, luego por la propiedad c) tenemos que

$$\bigwedge \{d(t) \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F)\} \in I, \quad \bigwedge \{d(t)' \mid t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F)\} \in I.$$

A partir de aquí tenemos que distinguir dos casos, según si V está contenido en Q_1 o en Q_2 . Supongamos primero que $V \subset Q_1$. Basta demostrar que $\prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F) \subset z$, pues entonces $\bigwedge_{t \in z} d(t) \in I$.

En efecto, si $t \in \prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F)$, entonces $t_i \in A_{r_i} \cap F$, luego $t_i = f(q_i)$, para cierto $q_i \in \bigcup_{j \in e'} S_j^{m+1}$. Pero entonces $t_i \in A_{q_i}$ y, como $r_i \in S_i^m$, tiene que ser $r_i \subset q_i$, luego, de hecho, $q_i \in S_i^{m+1}$. Como q_i extiende a r_i , por definición de f resulta que $t_i = H(A_{q'_i})$, donde $q'_i \in D_i$ extiende a q_i . Tenemos así una sucesión $q' \in \prod_{i \in e'} D_i = V \subset Q_1$, luego $t = \{H(A_{q'_i})\}_{i \in e'} \in z$.

Si $V \subset Q_2$ llamamos $z' = P \setminus z$ y demostramos que $\prod_{i \in e'} (A_{r_i} \cap F) \subset z'$, con lo que concluimos que $\bigwedge_{t \in P \setminus z} d(t)' \in I$. El razonamiento es idéntico, salvo que ahora llegamos a que $q' \in Q_2$, luego $t \notin z$, y de hecho, $t \in P \setminus z$. ■

Así pues, si ZF es consistente, a partir de TU no puede probarse ninguna de las formas del axioma de elección que fallan en el primer modelo de Cohen, como que $\mathcal{P}\omega$ puede ser bien ordenado, que todo conjunto infinito tiene un subconjunto numerable, etc.

7.3 Formas débiles de TU

Sabemos que el teorema de los ultrafiltros no puede demostrarse sin AE, pues implica, por ejemplo, que todo conjunto puede ser totalmente ordenado, o el axioma de elección para familias de conjuntos finitos. Sin embargo, cabría la posibilidad de que se pudiera demostrar sin AE la existencia de ultrafiltros en conjuntos sencillos, como ω . Obviamente todo conjunto no vacío X tiene ultrafiltros principales, es decir, ultrafiltros de la forma

$$U_x = \{A \in \mathcal{P}X \mid x \in A\},$$

pero, vamos a ver que sin AE no puede probarse que ω tenga ultrafiltros no principales.

Consideramos $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega \times \omega, 2, \omega)$ y, para cada $X \subset \omega \times \omega$, definimos $\pi_X \in \text{Aut}(\mathbb{P})$ mediante

$$\pi_X(p)(m, n) = \begin{cases} p(m, n) & \text{si } (m, n) \notin X, \\ 1 - p(m, n) & \text{si } (m, n) \in X. \end{cases}$$

Se cumple entonces que $H = \{\pi_X \mid X \in \mathcal{P}(\omega \times \omega)\}$ es un subgrupo de $\text{Aut}(\mathbb{P})$, pues π_\emptyset es la identidad, $\pi_X^{-1} = \pi_X$ y $\pi_X \circ \pi_Y = \pi_{X \Delta Y}$.

Para cada $e \subset \omega$, definimos $\text{Est}(e) = \{\pi_X \mid X \in \mathcal{P}\omega \wedge X \cap (e \times \omega) = \emptyset\}$, que es un subgrupo de H .

Sea \mathcal{F} el conjunto de los subgrupos K de H tales que existe $e \subset \omega$ finito de manera que $\text{Est}(e) \subset K \subset H$. Es fácil ver que se trata de un filtro normal de subgrupos de H .

A partir de aquí relativizamos las definiciones anteriores a un modelo transitivo numerable M de ZFC, consideramos un filtro genérico G y la extensión simétrica $N = SM[G]$.

Teorema 7.22 En el modelo N que acabamos de describir, $\mathcal{P}\omega$ no tiene ultrafiltros no principales.

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que $U \in N$ es un (ultrafiltro no principal) N en ω . Sea $U = \tau_G$, con $\tau \in SM^{\mathbb{P}}$ y sea $p \in G$ tal que

$$p \Vdash_S \tau \text{ es un ultrafiltro no principal en } \omega.$$

Sea $e \subset \omega$ finito tal que $\text{Est}(e) \subset \text{Sim}(\tau)$. Sea $i \in \omega \setminus e$ y sea

$$\sigma_i = \{(\check{n}, p) \mid p \in \mathbb{P} \mid (i, n, 1) \in p\} \in SM^{\mathbb{P}}.$$

Así, $s_i = \sigma_{iG} \in N$ y $s_i \subset \omega$, luego o bien $s_i \in U$, o bien $\omega \setminus s_i \in U$.

Si se da el primer caso, existe un $q \in G$ tal que $q \Vdash_S \sigma_i \in \tau$. Sea $m_0 \in \omega$ tal que, para cada $m \geq m_0$, se cumple $(i, m) \notin \mathcal{D}q$ y sea

$$X = \{(i, m) \mid m \in \omega \wedge m \geq m_0\}.$$

Así $\pi_X(q) = q$ y $\pi_X \in \text{Est}(e)$, luego $\pi_X(\tau) = \tau$. Por lo tanto,

$$q \Vdash_S \pi_X(\sigma_i) \in \tau,$$

luego $\pi_X(\sigma_i)_G \in U$, pero es claro que $\pi_X(\sigma_i)_G = \omega \setminus s_i$, con lo que tenemos una contradicción.

Lo mismo sucede si se da el segundo caso: tomamos una condición $q \in G$ tal que $q \Vdash_S \omega \setminus \sigma_i \in \tau$, elegimos m_0 y X del mismo modo, con lo que llegamos a que $q \Vdash_S \omega \setminus \pi_X(\sigma_i) \in \tau$, y así $\omega \setminus (\omega \setminus s_i) \in U$, es decir, $s_i \in U$, contradicción. ■

Sabemos [TC 11.8] que las dos afirmaciones siguientes son formas equivalentes de TU:

- a) Toda álgebra de Boole tiene un ultrafiltro.
- b) Todo filtro en un conjunto puede extenderse a un ultrafiltro.

Es obvio que b) no puede cambiarse por “todo conjunto (no vacío) tiene un ultrafiltro”, pues ya hemos observado que la existencia de ultrafiltros (principales) en un conjunto (no vacío) es un teorema de ZF. Sin embargo, cabría pensar si TU es equivalente en ZF a que todo conjunto infinito tiene un ultrafiltro no principal. La respuesta es nuevamente negativa.

Para probarlo consideraremos una variación mínima del modelo construido en el teorema 6.58, consistente en partir de $\mathbb{P} = \text{Fn}(2 \times \omega_1 \times \omega_1 \times \omega, 2, \aleph_1)^M$.

Con las modificaciones obvias, tenemos conjuntos $a_{\alpha, \beta}, b_{\alpha, \beta} \in M[G]$, donde ahora $\alpha < \omega_1^M$, que a su vez definen conjuntos $a_\alpha, b_\alpha \in \mathcal{P}\mathcal{P}\omega$, $P_\alpha = \{a_\alpha, b_\alpha\}$ y $P = \{P_\alpha \mid \alpha < \omega_1^M\}$, todos los cuales tienen nombres canónicos en $M^{\mathbb{P}}$.

Definimos el grupo $H \subset (\Sigma_{2 \times \omega_1 \times \omega_1})^M$ de mismo modo, sin más que cambiar ω por ω_1^M , pero consideramos el filtro \mathcal{F} de soportes numerables, es decir, un subgrupo K de H está en \mathcal{F} si y sólo si existe $E \subset 2 \times \omega_1^M \times \omega_1^M$ numerable M tal que $\text{Est}_H(E) \subset K \subset H$.

Es fácil ver que \mathcal{F} sigue siendo un filtro normal de subgrupos de H , por lo que podemos considerar la extensión genérica $N = SM[G]$. Todos los nombres canónicos de los conjuntos que estamos considerando son hereditariamente simétricos, por lo que, en particular, $P \in N$.

Teorema 7.23 *El modelo N que acabamos de describir cumple que todo conjunto infinito tiene un ultrafiltro no principal, pero no cumple el teorema de los ultrafiltros.*

DEMOSTRACIÓN: Por 5.17 sabemos que $\aleph_1^{M[G]} = \aleph_1^M$, de donde se sigue que también $\aleph_1^N = \aleph_1^M$. El argumento de 6.58 nos da ahora que existe $f \in N$ tal que $(f : \omega_1 \longrightarrow P \text{ biyectiva})^N$, y una mínima variante del argumento empleado allí prueba que P no tiene una función de elección. Por lo tanto, N no cumple TU, pues sabemos que TU implica el axioma de elección para familias de conjuntos finitos ([TC 11.15]).

Consideremos ahora un conjunto infinito $X \in N$. Entonces $X \in M[G]$ es infinito, luego (usando AE) tiene un subconjunto $Y \subset X$ numerable $^{M[G]}$. Sea $f : \omega \longrightarrow Y$ biyectiva, $f \in M[G]$. Para cada $i \in \omega$, existe $\sigma_i \in SM^{\mathbb{P}}$ tal que $f(i) = \sigma_{iG}$. Usando el axioma de elección en $M[G]$ podemos exigir que $\{\sigma_i\}_{i \in \omega} \in M[G]$. Ahora bien, por 5.8 tenemos que $\{\sigma_i\}_{i \in \omega} \in M$. Ahora usamos el axioma de elección en M , que nos da $\{E_i\}_{i \in \omega} \in M$ de modo que cada $E_i \subset 2 \times \omega_1^M \times \omega_1^M$ es numerable M y $\text{Est}_H(E_i) \subset \text{Sim}_H(\sigma_i)$.

Sea $E = \bigcup_{i \in \omega} E_i$, que sigue siendo numerable M y, si llamamos

$$\sigma = \{(p.o.(i, \sigma_i), \mathbb{1}) \mid i \in \omega\},$$

se cumple que $\text{Est}_H(E) \subset \text{Sim}_H(\sigma)$, luego $\sigma \in SM^{\mathbb{P}}$ y $f = \sigma_G \in N$. En definitiva, existe $f : \omega \longrightarrow X$ inyectiva, $f \in N$.

Ahora, si $A \in (\mathcal{P}X)^N$, tenemos que $f^{-1}[A] \in (\mathcal{P}\omega)^N$, luego es numerable en $M[G]$, luego por 5.8 se cumple que $f^{-1}[A] \in (\mathcal{P}\omega)^M$.

Finalmente consideramos (un ultrafiltro no principal en ω) $U \in M$ y observamos que

$$U^* = \{A \in \mathcal{P}X \mid f^{-1}[A] \in U\}^N \in N$$

es un ultrafiltro no principal en X . Notemos que U^* es un ultrafiltro porque $f^{-1}[A]$ y $f^{-1}[X \setminus A] = \omega \setminus f^{-1}[A]$ están ambos en $(\mathcal{P}\omega)^M$ y U es un ultrafiltro M y U^* no es principal porque no puede ser que $\{x\} \in U^*$, ya que, como f es inyectiva, $|f^{-1}[\{x\}]| \leq 1$, luego $f^{-1}[\{x\}] \notin U$, porque U no es principal. ■

Es fácil probar que el modelo del teorema anterior cumple el principio de elecciones dependientes (ED), luego ahora sabemos que, si bien implica el axioma de elección numerable, no garantiza la existencia de funciones de elección sobre conjuntos de \aleph_1 pares desordenados.

7.4 Apéndice: El teorema de Halpern-Läuchli

Para completar la demostración del teorema 7.19 nos falta probar 7.21. De hecho demostrarímos (en ZF) un resultado más general. Empezamos ampliando la definición 7.20.

Nota En toda esta sección “árbol” significará ω -árbol con una única raíz y sin elementos maximales, es decir, árbol de altura ω con niveles finitos, con un único nodo de altura 0 y en el que todo nodo tiene al menos un nodo por encima. ■

Definición 7.24 Recordemos que si T es un árbol, un conjunto $A \subset T$ *domina* a otro conjunto $B \subset T$ si todo elemento de B está por debajo de un elemento de A .

Diremos que A es (h, k) -*denso* si existe un nodo $x \in T$ de altura h tal que A domina al conjunto de todos los nodos de altura $h+k$ que extienden a x . Escribiremos “ k -denso” en lugar de $(0, k)$ -denso. (Notemos que A es k -denso si y sólo si domina al nivel k -ésimo de T).

Si $\{T_i\}_{i < d}$ es una familia de árboles en las condiciones anteriores, un producto (h, k) -dominante⁴ es un conjunto de la forma $\prod_{i < d} D_i$, donde cada D_i es (h, k) -denso en T_i . Diremos “ k -dominante” en lugar de $(0, k)$ -dominante.

Teorema 7.25 (Halpern-Läuchli) *Sea $\{T_i\}_{i < d}$ una familia de ω -árboles con una única raíz y sin nodos maximales y sea $Q \subset \prod_{i < d} T_i$. Entonces se da uno de estos dos casos:*

- a) *Q contiene un producto k -dominante para cada $k \in \omega$.*
- b) *Existe un $h \in \omega$ tal que, para todo $k \in \omega$, el conjunto $\prod_{i < d} T_i \setminus Q$ contiene un producto (h, k) -dominante.*

Veamos en primer lugar que de aquí se deduce 7.21:

DEMOSTRACIÓN DE 7.20: Más en general, vamos a probar que el teorema es cierto para particiones $\{Q_j\}_{j < q}$ de $\prod_{i < d} T_i|_n$ (de modo que 7.20 es el caso $q = 2$).

Observamos que el teorema es trivial para $q = 1$. A continuación suponemos que es cierto para particiones de q y lo probamos para $q + 1$.

Si no se cumple para $q + 1$, llamamos \mathcal{T} el conjunto de todas las sucesiones $Q = \{Q_j\}_{j < q+1}$ de conjuntos disjuntos dos a dos tales que existe un $n \in \omega$ de modo que

$$\prod_{i < d} T_i|_n = \bigcup_{j < q+1} Q_j$$

y Q no cumple la conclusión del teorema, es decir, ningún Q_j contiene un producto $(m, 1)$ -dominante, con $m < n$.

⁴Notemos que los conjuntos m -dominantes definidos en 7.20 son los $(m, 1)$ -dominantes en este sentido.

Al suponer que no se cumple el teorema estamos diciendo que para cada $n \in \omega$ existe una partición en \mathcal{T} de $\prod_{i < d} T_i|_n$ en las condiciones indicadas.

Definimos en \mathcal{T} la relación de orden según la cual $Q' \leq Q$ si y sólo si Q' es una partición de $\prod_{i < d} T_i|m$, Q es una partición de $\prod_{i < d} T_i|_n$, $m \leq n$ y $Q'_j = Q_j \cap \prod_{i < d} T_i|m$ para cada $i < q + 1$.

Es inmediato que si $Q \in \mathcal{T}$ es una partición de $\prod_{i < d} T_i|_n$ y $m < n$, la partición Q' dada por $Q'_j = Q_j \cap \prod_{i < d} T_i|m$ también está en \mathcal{T} , pues si un elemento de Q' contuviera un producto $(m, 1)$ -dominante, lo mismo le sucedería al elemento correspondiente de Q . Además, estas particiones Q' son las únicas que tiene por debajo.

Concluimos que \mathcal{T} es un árbol y que sus elementos de altura n son precisamente las particiones de $\prod_{i < d} T_i|_n$ (que incumplen el teorema). La hipótesis de que el teorema falla para $q + 1$ se traduce ahora en que \mathcal{T} tiene altura ω , y obviamente sus niveles son finitos, pues sólo hay un número finito de particiones de cada $\prod_{i < d} T_i|_n$. El teorema de König [TC 9.6] resulta que \mathcal{T} tiene un camino C .

Definimos una partición $Q = \{Q_j\}_{j < q+1}$ de $\prod_{i < d} T_i$ tomando $Q_j = \bigcup_{Q' \in C} Q'_j$.

Aplicamos a $Q_1 \cup \dots \cup Q_q$ el teorema anterior, con lo que se da uno de estos dos casos:

- a) Para cada $k \in \omega$ la unión $Q_1 \cup \dots \cup Q_q$ contiene un producto k -dominante.
- b) Existe un $h \in \omega$ tal que Q_{q+1} contiene un producto $(h, 1)$ -dominante.

Pero el caso b) no puede darse, pues si llamamos $\prod_{i < d} D_i$ al producto $(h, 1)$ -dominante, como los niveles de cada T_i son finitos, podemos suponer que cada D_i es finito (pues sólo necesitamos un conjunto finito de nodos para dominar a un conjunto finito de nodos), luego podemos tomar un $n \in \omega$ tal que cada $D_i \subset T_i|_n$, pero entonces la partición $\{Q_j \cap \prod_{i < d} T_i|_n\}_{j < q+1}$ cumple el teorema (pues su última componente contiene un producto $(h, 1)$ -dominante), cuando por otro lado se trata de un elemento del camino C , luego está en \mathcal{T} y no debería cumplirlo.

Por lo tanto se cumple a). Ahora aplicamos la hipótesis de inducción, según la cual existe un $k \in \omega$ tal que toda partición en q conjuntos de $\prod_{i < d} T_i|_k$ contiene un producto $(h, 1)$ -dominante, para cierto $h < k$.

Por a) aplicado a este k , tenemos que $Q_1 \cup \dots \cup Q_q$ contiene un producto k -dominante $\prod_{i < d} D_i$. Entonces D_i es k -denso en T_i , luego domina a $T_i|_k$. Sea $f_i : T_i|_k \longrightarrow D_i$ tal que $\bigwedge x \in T_i|_k x \leq f_i(x)$. Para $0 \leq j \leq q$ definimos

$$Q'_j = \{x \in \prod_{i < d} T_i|_k \mid \{f_i(x_i)\}_{i < d} \in Q_i\}.$$

Claramente $Q' = \{Q'_j\}_{j < q}$ es una partición de $\prod_{i < d} T_i|_k$, luego, por la elección de k , existe un $j < q$ tal que Q'_j contiene un producto $(h, 1)$ -dominante $\prod_{i < d} D'_i$, para cierto $h < k$, pero es claro entonces que $\prod_{i < d} f_i[D'_i] \subset Q_i$ es un producto $(h, 1)$ -dominante, y a partir de aquí llegamos a la misma contradicción que en el caso b). ■

A partir de aquí desarrollamos los conceptos necesarios para demostrar 7.25.

Definición 7.26 Si T es un árbol, $x \in T$, $n \in \omega$ y $B \subset T$, definimos

$$x(T) = \{y \in T \mid y \geq x\}, \quad n(T, B) = \{x(T) \cap B \mid x \in \text{Niv}_n(T)\}.$$

Notemos que si B es $h + k$ -denso en T y $a \in n(T, b)$, para un $n \leq h$, entonces a es (h, k) -denso en T .

Fijado $d \in \omega$, llamaremos *signos* a los elementos de $X_d = d \times 4$, si bien usaremos una notación especial para representarlos:

$$\exists A_i \equiv (i, 0), \quad \forall x_i \equiv (i, 1), \quad \forall a_i \equiv (i, 2), \quad \exists x_i \equiv (i, 3).$$

Llamaremos *fórmulas* a las sucesiones $W \in X_d^{\leq 2d}$ que cumplen las condiciones siguientes:

- a) Para cada i , en W aparece a lo sumo uno de los dos los signos $\forall x_i$ y $\exists x_i$, y en tal caso sólo aparece una vez.
- b) Para cada i , en W aparece a lo sumo uno de los dos los signos $\forall a_i$ y $\exists A_i$, y en tal caso sólo aparece una vez.
- c) Si W contiene a $\forall a_i$, entonces contiene a $\exists x_i$ en una posición posterior.
- d) Si W contiene a $\exists A_i$, entonces contiene a $\forall x_i$ en una posición posterior.

Equivalentemente, las fórmulas son las sucesiones de signos que se pueden construir empezando por un $\exists x_i$ o un $\forall x_i$ y añadiendo signos por la izquierda, con la condición de que sólo podemos añadir un $\exists x_i$ o un $\forall x_i$ si no hemos incluido ya uno de ellos, sólo podemos añadir un $\forall a_i$ si previamente hemos incluido $\exists x_i$ (pero no otro $\forall a_i$) y sólo podemos añadir un $\exists A_i$ si previamente hemos incluido $\forall x_i$ (pero no otro $\exists A_i$).

Representaremos por F_d el conjunto de todas las fórmulas, y por S_d el conjunto de todas las *sentencias*, que definimos como las fórmulas de longitud $2d$.

Observemos que, para cada i , en cada sentencia tiene que aparecer necesariamente un $\forall x_i$ o un $\exists x_i$, así como un $\forall a_i$ o bien un $\exists A_i$.

Por ejemplo, S_1 consta únicamente de las sentencias $\exists A_0 \forall x_0$ y $\forall a_0 \exists x_0$, mientras que S_2 consta de 24 sentencias, entre las que se encuentran

$$\exists A_0 \forall x_0 \exists A_1 \forall x_1, \quad \forall a_1 \exists A_0 \forall x_0 \exists x_1, \quad \text{etc.}$$

Ahora vamos a asignar un significado a cada fórmula. Para ello fijamos una familia de árboles $\{T_i\}_{i < d}$, un conjunto $Q \subset \prod_{i < d} T_i$ (de acuerdo con las hipótesis de 7.25), así como una sucesión de números naturales $n = \{n_i\}_{i < d}$ y una sucesión $B = \{B_i\}_{i < d}$, con $B_i \subset T_i$.

Vamos a definir una aplicación $I : F_d \times \prod_{i < d} \mathcal{P}T_i \times \prod_{i < d} T_i \rightarrow 2$, aunque usaremos la notación:

$$\models W[n, B, Y, y] \equiv F(W, Y, y) = 1.$$

Definiremos I por recursión sobre la relación bien fundada

$$(W, Y, y) \prec (W', Y', y') \leftrightarrow \ell(W) < \ell(W').$$

En la práctica, esto significa que podemos definir $\models W[n, B, Y, y]$ supuesto que ya está definido para fórmulas de longitud menor.

Representaremos por Y_i^A el elemento de $\prod_{i < d} \mathcal{P}T_i$ que coincide con Y salvo que $Y_i = A$, e igualmente y_i^x será el elemento de $\prod_{i < d} T_i$ que coincide con y salvo que $y_i = x$.

En primer lugar, establecemos que

$$\models \emptyset[n, B, Y, y] \leftrightarrow y \in Q.$$

Para sucesiones no vacías, distinguimos casos según cuál sea su primer signo:

- a) $\models \exists x_i W[n, B, Y, y] \leftrightarrow \bigvee x \in Y_i \models W[n, B, Y, y_i^x].$
- b) $\models \forall x_i W[n, B, Y, y] \leftrightarrow \bigwedge x \in Y_i \models W[n, B, Y, y_i^x].$
- c) $\models \exists A_i W[n, B, Y, y] \leftrightarrow \bigvee A(A \subset B_i \wedge A \text{ es } n_i\text{-denso en } T_i \wedge \models W[n, B, Y_i^A, y]).$
- d) $\models \forall a_i W[n, B, Y, y] \leftrightarrow \bigwedge a \in n_i(T_i, B_i) \models W[n, B, Y_i^a, y].$

Ejemplo Para $d = 2$ tenemos que

$$\begin{aligned} \models (\exists A_0 \forall a_1 \exists x_1 \forall x_0)[n, B, Y_0, Y_1, y_0, y_1] &\leftrightarrow \bigvee A_0 (A_0 \subset B_0 \wedge A_0 \text{ es } n_0\text{-denso en } T_0 \\ &\wedge \models (\forall a_1 \exists x_1 \forall x_0)[n, B, A_0, Y_1, y_0, y_1]) \leftrightarrow \\ &\bigvee A_0 (A_0 \subset B_0 \wedge A_0 \text{ es } n_0\text{-denso en } T_0 \wedge \\ &\bigwedge a_1 \in n_1(T_1, B_1) \models (\exists x_1 \forall x_0)[n, B, A_0, a_1, y_0, y_1]) \leftrightarrow \\ &\bigvee A_0 (A_0 \subset B_0 \wedge A_0 \text{ es } n_0\text{-denso en } T_0 \wedge \\ &\bigwedge a_1 \in n_1(T_1, B_1) \bigvee x_1 \in a_1 \models (\forall x_0)[n, B, A_0, a_1, y_0, x_1]) \leftrightarrow \\ &\bigvee A_0 (A_0 \subset B_0 \wedge A_0 \text{ es } n_0\text{-denso en } T_0 \wedge \\ &\bigwedge a_1 \in n_1(T_1, B_1) \bigvee x_1 \in a_1 \bigwedge x_0 \in A_0 \models \emptyset[n, B, A_0, a_1, x_0, x_1]) \leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \forall A_0 (A_0 \subset B_0 \wedge A_0 \text{ es } n_0\text{-denso en } T_0 \wedge \\ & \wedge \exists a_1 \in n_1 (T_1, B_1) \forall x_1 \in a_1 \wedge x_0 \in A_0 (x_0, x_1) \in Q). \end{aligned}$$

Observamos que $\models (\exists A_0 \forall a_1 \exists x_1 \forall x_0)[n, B, Y, y]$ no depende de (Y, y) , y es claro que esto no es casual. El teorema siguiente muestra la situación general:

Teorema 7.27 *Sea $W \in F_d$ y sean $n, n', B, B', Y, Y', y, y'$ según la definición anterior, y supongamos además que*

- a) $Y_i = Y'_i$ para cada índice i tal que ni $\forall a_i$ ni $\exists A_i$ está en W pero $\forall x_i$ o $\exists x_i$ está en W ,
- b) $y_i = y'_i$ para cada i tal que ni $\forall x_i$ ni $\exists x_i$ están en W ,
- c) $n_i = n'_i$ y $B_i = B'_i$ para cada i tal que $\forall a_i$ o $\exists A_i$ está en W .

Entonces $\models W[n, B, Y, y] \leftrightarrow \models W[n', B', Y', y']$. En particular, si W es una sentencia, la fórmula $\models W[n, B, Y, y]$ es independiente de Y , y.

DEMOSTRACIÓN: Razonamos por inducción sobre la longitud de W . Para $W = \emptyset$ la hipótesis es $y = y'$, y la conclusión es inmediata. Ahora basta suponerlo cierto para W y probarlo para $\exists x_i W$, $\forall x_i W$, $\exists A_i W$, $\forall a_i W$ (suponiendo además que estas cadenas sean realmente fórmulas).

En el caso $\exists x_i W$, tenemos que W no puede contener ni $\exists A_i$ ni $\forall a_i$, luego tenemos que $Y_i = Y'_i$. Entonces

$$\begin{aligned} & \models \exists x_i W[n, B, Y, y] \leftrightarrow \forall x \in Y_i \models W[n, B, Y, y^x_i] \leftrightarrow \\ & \forall x \in Y'_i \models W[n', B', Y', y'^x_i] \leftrightarrow \models \exists x_i W[n', B', Y', y'], \end{aligned}$$

donde hemos aplicado la hipótesis de inducción. En efecto:

- a) Si $\forall a_j$ y $\exists A_j$ no están en W , tampoco están en $\exists x_i W$, y si $\forall x_j$ o $\exists x_j$ está en W , también está en $\exists x_i W$, luego se cumple que $Y_j = Y'_j$.
- b) Si $\forall x_j$ y $\exists x_j$ no están en W , o bien $j \neq i$ y tampoco están en $\exists x_i W$, con lo que $y_j = y'_j$, luego $(y^x_i)_j = (y'^x_i)_j$, o bien $j = i$, y la conclusión es trivial.
- c) Si $\forall a_j$ o $\exists A_j$ está en W , también está en $\exists x_i W$, luego $n_j = n'_j$ y $B_j = B'_j$.

El argumento para $\forall x_i W$ es idéntico, y los otros dos casos son incluso más simples. ■

Definición 7.28 Si $W \in S_d$, $n \in {}^d\omega$ y $B = \{B_i\}_{i < d} \in \prod_{i < d} \mathcal{PT}_i$, escribiremos

$$\models W[n, B] \equiv \forall Y \in \prod_{i < d} \mathcal{PT}_i \forall y \in \prod_{i < d} T_i \models W[n, B, Y, y],$$

y acabamos de ver que la elección del par (Y, y) es irrelevante.

Si $p \in \omega$, escribiremos

$$\Phi(W, n, p) \equiv \bigwedge B \in \prod_{i < d} \mathcal{P}T_i (\bigwedge i < d \text{ } B_i \text{ es } p\text{-denso en } T_i \rightarrow \models W[n, B]).$$

Por último:

$$\models W \equiv \bigwedge n \in {}^d\omega \bigvee p \in \omega \Phi(W, n, p).$$

Ahora vamos a construir un cálculo deductivo correcto respecto de la semántica que acabamos de introducir.

Definimos “ser una consecuencia inmediata” como la relación \vdash_d en S_d respecto a la que dos sentencias están relacionadas si y sólo si cumplen uno de los casos siguientes, en los que U, V representan cadenas de signos y α, β representan A_i, a_i o x_i :

Regla 1

$$\begin{aligned} U \exists \alpha \exists \beta V \vdash_d U \exists \beta \exists \alpha V, \\ U \forall \alpha \forall \beta V \vdash_d U \forall \beta \forall \alpha V, \\ U \exists \alpha \forall \beta V \vdash_d U \forall \beta \exists \alpha V, \end{aligned}$$

donde en la tercera se entiende que los dos miembros son realmente sentencias, es decir, que al invertir los signos no se violan las reglas de precedencia que definen las fórmulas.

Regla 2

$$\begin{aligned} U \forall a_i \exists x_i V \vdash_d U \exists A_i \forall x_i V, \\ U \exists A_i \forall x_i V \vdash_d U \forall a_i \exists x_i V. \end{aligned}$$

Regla 3 Si $\sigma : d \longrightarrow d$ es biyectiva y $0 \leq r < d - 1$,

$$(\forall a_{\sigma i})_0^r (\exists A_{\sigma i})_{r+1}^{d-1} V \vdash_d (\exists A_{\sigma i})_{r+1}^{d-1} (\forall a_{\sigma i})_0^r V,$$

donde $(\forall a_{\sigma i})_1^r$ es una abreviatura por $\forall a_{\sigma 1} \dots \forall a_{\sigma r}$, y análogamente en los otros casos.

Un ejemplo concreto de la regla 3 es el siguiente:

$$\forall a_1 \forall a_2 \exists A_0 \exists A_3 \exists x_2 \forall x_0 \forall x_3 \exists x_1 \vdash_4 \exists A_0 \exists A_3 \forall a_1 \forall a_2 \exists x_2 \forall x_0 \forall x_3 \exists x_1$$

Más en general, escribiremos $W \vdash_d W'$ si existe una sucesión finita de sentencias de L_d que empieza por W , termina por W' y cada sentencia es consecuencia inmediata de la sentencia anterior. Si no hay posibilidad de confusión suprimiremos el subíndice d .

Este cálculo deductivo es correcto en el sentido siguiente:

Teorema 7.29 Si $W, W' \in S_d$ y $W \vdash W'$, entonces $\models W$ implica $\models W'$.

DEMOSTRACIÓN: Claramente, basta probar el teorema para el caso en que W' es consecuencia inmediata de W . Veamos primero el caso en que W' resulta de aplicar a W la regla 2. Consideremos concretamente el primer caso de esta regla.

Fijamos un $n \in {}^d\omega$. Por hipótesis existe un $p \in \omega$ tal que $\Phi(U \forall a_i \exists x_i V, n, p)$. Basta probar que se cumple $\Phi(U \exists A_i \forall x_i V, n, p)$. Para ello tomamos una familia de conjuntos B_i , cada uno de los cuales sea p -denso en T_i . Sabemos que se cumple $\models U \forall a_i \exists x_i V[n, B]$ y tenemos que probar $\models U \exists A_i \forall x_i V[n, B]$.

A su vez, basta probar que para todo $Y \in \prod_{i < d} \mathcal{P}T_i$ y todo $y \in \prod_{i < d} T_i$ se cumple que

$$\models U \forall a_i \exists x_i V[n, B, Y, y] \rightarrow \models U \exists A_i \forall x_i V[n, B, Y, y]$$

para toda cadena de signos U . El único caso no trivial es $U = \emptyset$, luego, en definitiva, tenemos que probar que

$$\models \forall a_i \exists x_i V[n, B, Y, y] \rightarrow \models \exists A_i \forall x_i V[n, B, Y, y].$$

La hipótesis es que

$$\bigwedge a \in n_i(T_i, B_i) \bigvee x \in a \models V[n, B, Y_i^a, y_i^x]$$

y tenemos que probar que

$$\bigvee A (A \subset B_i \wedge A \text{ es } n_i\text{-denso en } T_i \wedge \bigwedge x \in A \models V[n, B, Y_i^A, y_i^x]).$$

Definimos

$$A = \{x \in B_i \mid \bigvee a \in n_i(T_i, B_i) (x \in a \wedge \models V[n, B, Y_i^a, y_i^x])\}.$$

Una simple inducción prueba que si en V no aparecen x_i, a_i, A_i , la relación $\models V[n, B, Y, y]$ no depende del valor de Y_i , por lo que de hecho tenemos que

$$A = \{x \in B_i \mid \bigvee a \in n_i(T_i, B_i) (x \in a \wedge \models V[n, B, Y_i^A, y_i^x])\}.$$

En particular $\bigwedge x \in A \models V[n, B, Y_i^A, y_i^x]$, y sólo falta probar que A es n_i -denso en T_i , pero esto se cumple, pues para todo $u \in \text{Niv}_{n_i}(T_i)$, se cumple que $a = u(T_i) \cap B_i \in n_i(T_i, B_i)$, luego existe un $x \in a \cap A$ y $u \leq x \in A$.

Para probar la corrección del segundo caso de la regla 2 razonamos del mismo modo hasta llegar a que, partiendo de

$$\bigvee A (A \subset B_i \wedge A \text{ es } n_i\text{-denso en } B_i \wedge \bigwedge x \in A \models V[n, B, Y_i^A, y_i^x]),$$

hemos de probar

$$\bigwedge a \in n_i(T_i, B_i) \bigvee x \in a \models V[n, B, Y_i^a, y_i^x].$$

Ahora bien, fijado $A \subset B_i$ según la hipótesis, si $a \in n_i(T_i, B_i)$, esto significa que $a = u(T_i) \cap B_i$, para cierto $u \in \text{Niv}_{n_i}(T_i)$. Como A es n_i -denso, existe un

$x \in A \subset B_i$ tal que $u \leq x$, pero entonces $x \in a$ y además $\models V[n, B, Y_i^A, y_i^x]$, pero, tal y como hemos observado en el caso anterior, esto equivale a $\models V[n, B, Y_i^a, y_i^x]$, porque en V no aparecen x_i, a_i, A_i .

Dejamos al lector la comprobación de la corrección de la regla 1, pues el planteamiento de la prueba es idéntico al de la regla 2 y en la parte final sólo hay que apelar a hechos lógicos obvios, como que dos cuantificadores del mismo tipo se pueden intercambiar y que un cuantificador universal siempre se puede pasar de detrás a delante de un cuantificador existencial.

Veamos la corrección de la regla 3. Reordenando la sucesión de árboles $\{T_i\}_{i < d}$ (así como las sucesiones n y B) el problema se reduce al caso en que σ es la identidad.

Llamemos $W = (\forall a_i)_0^r (\exists A_i)_{r+1}^{d-1} V$ y $W' = (\exists A_i)_{r+1}^{d-1} (\forall a_i)_0^r V$. Suponemos $\models W$, es decir, que

$$\bigwedge n \in {}^d\omega \bigvee p \in \omega \Phi(W, n, p).$$

Sea $p : {}^d\omega \longrightarrow \omega$ una función tal que

$$\bigwedge n \in {}^d\omega \Phi(W, n, p(n)).$$

Notemos que si $p < p'$, entonces todo conjunto p' -denso es p -denso o, al revés, si una propiedad vale para todo conjunto p -denso, entonces vale para todo conjunto p' -denso. Esto hace que $\Phi(W, n, p) \rightarrow \Phi(W, n, p')$, luego podemos cambiar cada $p(n)$ por un número mayor sin que deje de cumplirse la propiedad requerida. En particular podemos exigir que $\bigwedge n \in {}^d\omega \bigwedge i < d n_i < p(n)$.

Ahora fijamos $n \in {}^d\omega$ y tenemos que encontrar un $p \in \omega$ tal que $\Phi(W', n, p)$.

Definimos $G : \omega \longrightarrow \omega$ mediante

$$G(0) = \max\{n_i \mid i < d\}, \quad G(j+1) = p(k), \text{ donde } k_i = \begin{cases} n_i & \text{si } i \leq r, \\ G(j) & \text{si } r < i < d. \end{cases}$$

Sea $m = |\prod_{i=0}^r n_i(T_i, T_i)|$ y sea $p_j = G(m-j)$, para $0 \leq j \leq m$. Vamos a probar que p_0 cumple lo requerido.

Observemos que, como $r < d-1$, $G(j+1) = p(k) > k_{d-1} = G(j)$, luego $p_{j+1} < p_j$, por lo que todo conjunto p_j -denso es también p_{j+1} -denso. Además, $p_j \geq n_i$, para todo i y todo j .

Fijamos una sucesión B tal que cada B_i sea p_0 -denso en T_i . Tenemos que probar $\models W'[n, B]$. Por lo que acabamos de observar, B_i es p_j -denso en T_i para todo $0 \leq j \leq m$.

Observemos que V contiene o bien a $\forall x_i$ o bien a $\exists x_i$ para cada $i < d$, y no contiene ni a $\forall a_i$ ni a $\exists A_i$. El teorema 7.27 nos da entonces que $\models V[n, B, Y, y]$ no depende ni de n , ni de B , ni de y , por lo que podemos escribir simplemente $\models V[Y]$. Así, $\models W'[n, B]$ significa que existe $A \in \prod_{r < i < d} \mathcal{P}B_i$ de modo que cada A_i es n_i -denso en T_i y

$$\bigwedge a \in \prod_{i \leq r} n_i(T_i, B_i) \models V[a \cap A].$$

Observemos que $|\prod_{i \leq r} n_i(T_i, B_i)| = m$, pues $p_0 > n_i$, luego B_i es n_i -denso en T_i , lo que implica que si $x, y \in n_i$ cumplen $x \neq y$, entonces $x(T_i, B_i) \neq y(T_i, B_i)$, luego $|n_i(T_i, B_i)| = |\text{Niv}_{n_i}(T_i)| = |n_i(T_i, T_i)|$. Por lo tanto, basta probar, por inducción sobre $j \leq m$:

Para todo $J \subset \prod_{i \leq r} n_i(T_i, B_i)$ con $|J| = j$, existe $A \in \prod_{r < i < d} \mathcal{P}B_i$ tal que A_i es p_j -denso en T_i y para todo $a \in J$ se cumple $\models V[a \cap A]$.

En efecto: Para $j = 0$ no hay nada que probar. Si se cumple para J y $J' = J \cup \{b\}$, por hipótesis de inducción existe A que cumple el resultado para J y j . Sea $k = (n_0, \dots, n_r, p_{j+1}, \dots, p_{j+1})$, de modo que $\Phi(W, k, p(k))$, que es lo mismo que $\Phi(W, k, p_j)$. Consideramos ahora

$$B' = \begin{cases} B_i & \text{si } i \leq r, \\ A_i & \text{si } r < i < d, \end{cases}$$

de modo que B'_i es p_j -denso en T_i , luego, por definición de Φ , tenemos que $\models W[k, B']$. A su vez esto implica que existen conjuntos $A'_i \subset A_i$ de modo que A'_i es p_{j+1} -denso en T_i y $\models V[b \cap A']$.

Ahora, una simple inducción similar a la empleada en la prueba de 7.27 (aunque más simple) muestra que, para todo $a \in J$, como $\models V[a \cap A]$ y $A'_i \subset A_i$, también se cumple $\models V[a \cap A']$. (La idea es que cada A_i sólo interviene en la forma $\bigwedge x \in A_i$, y si todo $x \in A_i$ cumple una propiedad, lo mismo vale para todo $x \in A'_i$.) Por lo tanto, $\models V[a \cap A']$ se cumple para todo $a \in J'$, como había que probar. ■

El último resultado previo que necesitamos es el siguiente:

Teorema 7.30 $\forall a_0 \dots \forall a_{d-1} \exists x_0 \dots \exists x_{d-1} \vdash \exists A_0 \dots \exists A_{d-1} \forall x_0 \dots \forall x_{d-1}$.

DEMOSTRACIÓN: Veamos algunos resultados auxiliares:

a) $\forall a_{d-1} (\exists A_i)_0^{d-2} (\forall x_i)_0^{d-2} \exists x_{d-1} \vdash \exists A_{d-1} (\forall a_i)_0^{d-2} (\exists x_i)_0^{d-2} \forall x_{d-1}$.

En efecto:

$$\begin{aligned} & \forall a_{d-1} (\exists A_i)_0^{d-2} (\forall x_i)_0^{d-2} \exists x_{d-1} \\ & (\exists A_i)_0^{d-2} \forall a_{d-1} (\forall x_i)_0^{d-2} \exists x_{d-1} \quad \text{Regla 3} \\ & (\exists A_i \forall x_i)_0^{d-2} \forall a_{d-1} \exists x_{d-1} \quad \text{Regla 1 (varias veces)} \\ & (\forall a_i \exists x_i)_0^{d-2} \exists A_{d-1} \forall x_{d-1} \quad \text{Regla 2 (varias veces)} \\ & (\forall a_i)_0^{d-2} \exists A_{d-1} (\exists x_i)_0^{d-2} \forall x_{d-1} \quad \text{Regla 1 (varias veces)} \\ & \exists A_{d-1} (\forall a_i)_0^{d-2} (\exists x_i)_0^{d-2} \forall x_{d-1} \quad \text{Regla 3} \end{aligned}$$

b) Si $UV \in S_d$, en U no aparecen ni $\forall x_i$ ni $\exists x_i$ para ningún i y U' es una reordenación de U , entonces $UV \vdash U'V$.

Podemos suponer que U contiene cuantificadores de los dos tipos, pues en caso contrario basta aplicar oportunamente la regla 1. Así pues, existe un $r < d - 1$ y una permutación σ de modo que:

$$\begin{array}{ll} UV \\ (\forall a_{\sigma i})_0^r (\exists A_{\sigma i})_{r+1}^{d-1} V & \text{Regla 1 (varias veces)} \\ (\exists A_{\sigma i})_{r+1}^{d-1} (\forall a_{\sigma i})_0^r V & \text{Regla 3} \\ U'V & \text{Regla 1 (varias veces)} \end{array}$$

c) Si $W \vdash_{d-1} W'$, entonces

$$\forall a_{d-1} W \vdash_d \forall a_{d-1} W' \exists x_{d-1} \quad \text{y} \quad \exists A_{d-1} W \vdash \exists A_{d-1} W' \forall x_{d-1}.$$

En efecto, si W' se sigue de W por la regla 1 o la regla 2, la regla correspondiente demuestra también las dos conclusiones.

Si W' se sigue de W por la regla 3, entonces $W = W_1 W_2$, donde en W_1 sólo aparecen signos de la forma $\forall a_i, \exists A_i$ y en W_2 sólo aparecen $\forall x_i$ y $\exists x_i$ y basta aplicar el apartado b) con $U = \forall a_{d-1} W_1$ y $V = W_2 \exists x_{d-1}$ en un caso y $U = \exists A_{d-1} W_1$, $V = W_2 \forall x_{d-1}$ en el otro.

En general, esto prueba que al anteponer $\forall a_{d-1}$ y posponer $\exists x_{d-1}$ a cada sentencia de una deducción de W' a partir de W obtenemos una sucesión de sentencias de S_d que puede prolongarse a una deducción, e igualmente si anteponemos $\exists A_{d-1}$ y posponemos $\forall x_{d-1}$.

Ahora obtenemos la conclusión por inducción sobre d . Si $d = 1$ lo que hay que probar es un caso particular de la regla 2. Si vale para $d - 1$, entonces

$$\begin{array}{ll} (\forall a_i)_0^{d-1} (\exists x_i)_0^{d-1} \\ \forall a_{d-1} (\forall a_i)_0^{d-2} (\exists x_i)_0^{d-2} \exists x_{d-1} & \text{Regla 1 (varias veces)} \\ \forall a_{d-1} (\exists A_i)_0^{d-2} (\forall x_i)_0^{d-2} \exists x_{d-1} & \text{Hipótesis de inducción y c)} \\ \exists A_{d-1} (\forall a_i)_0^{d-2} (\exists x_i)_0^{d-2} \forall x_{d-1} & \text{a)} \\ \exists A_{d-1} (\exists A_i)_0^{d-2} (\forall x_i)_0^{d-2} \forall x_{d-1} & \text{Hipótesis de inducción y c)} \\ (\exists A_i)_0^{d-1} (\forall x_i)_0^{d-1} & \text{Regla 1.} \end{array}$$

DEMOSTRACIÓN DE 7.25: Fijados los árboles T_i y el conjunto Q que determinan la relación \models , consideramos las sentencias

$$W_0 = (\forall a_i)_0^{d-1} (\exists x_i)_0^{d-1}, \quad W_1 = (\exists A_i)_0^{d-1} (\forall x_i)_0^{d-1}.$$

Distinguimos dos casos:

a) Si $\models W_0$, entonces también $\models W_1$. Vamos a comprobar que se cumple el caso a) del enunciado. En efecto, dado $k \in \omega$ tomamos $n \in {}^d\omega$ dado por

$n_i = k$, y sabemos que existe un $p \in \omega$ tal que $\Phi(W_2, n, p)$. Fijamos $B_i = T_i$, obviamente p -denso en T_i , con lo que $\models W_2(n, B)$ y esto significa que existen conjuntos $A_i \subset T_i$ de modo que A_i es k -denso en T_i y $\bigwedge x \in \prod_{i < d} A_i \ x \in Q$, es decir, que Q contiene al producto k -dominante $\prod_{i < d} A_i$.

b) Si no $\models W_0$, vamos a probar el caso b) del enunciado. En principio tenemos que existe un $n \in {}^d\omega$ tal que para todo $p \in \omega$ no se cumple $\Phi(W_0, n, p)$. Tomamos $h = \max\{n_i \mid i < d\}$ y, fijado $k \in \omega$, consideramos $p = h + k$, con lo que existen conjuntos B_i , cada uno de los cuales es p -denso en T_i , pero no $\models W_0[n, B]$. Esto significa que existen conjuntos $a_i \in n_i(T_i, B_i)$ tales que para todo $x \in \prod_{i < d} a_i$ se cumple que $x \notin Q$, es decir, que $\prod_{i < d} a_i \subset \prod_{i < d} T_i \setminus Q$.

Sólo falta observar que cada a_i es (h, k) -denso en T_i , pues en principio existe un $x \in T_i$ de altura $n_i \leq h$ tal que $a = x(T_i) \cap B_i$, luego podemos tomar un $x' \in T_i$ de altura h tal que $x \leq x'$, y entonces a_i domina a todas las extensiones de x' de altura $h + k = p$, pues si y es una de ellas existe un $b \in B_i$ tal que $y \leq b$, luego $b \in x(T_i) \cap B_i = a_i$. ■

Capítulo VIII

Extensiones iteradas y el axioma de Martin

En 1971, R.M. Solovay y S. Tennenbaum probaron mediante una extensión genérica la consistencia de la hipótesis de Suslin. El argumento se basaba en las ideas siguientes: Partimos de un modelo transitivo numerable M de ZFC y queremos conseguir una extensión genérica en la que no haya árboles de Suslin. De hecho basta con garantizar que no haya árboles de Suslin bien podados (véase [TC 9.14, 9.15]). Si $(A, \leq) \in M$ es un árbol de Suslin bien podado en M , entonces $\mathbb{P} = (A, \leq^*)$, donde $p \leq^* q \leftrightarrow q \leq p$, es un c.p.o. (con máximo) en el que los conjuntos $D_\alpha = \{p \in A \mid \text{alt}_Ap \geq \alpha\}$ son densos. Además \mathbb{P} cumple la condición de cadena numerable. Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces A sigue siendo un \aleph_1 -árbol en $M[G]$, pero ya no es un árbol de Suslin, pues el conjunto $C = \{p \in A \mid \forall q \in G \ p \leq q\}$ es un camino en A .

Vemos así que para destruir un árbol de Suslin basta con ponerlo “copa abajo” y pasar a una extensión genérica. Ahora bien, con esto no garantizamos la hipótesis de Suslin, pues en M puede haber más árboles de Suslin o, lo que es peor, pueden aparecer nuevos árboles de Suslin en $M[G]$ que no estuvieran en M . Solovay y Tennenbaum resolvieron esto mediante una sucesión transfinita de extensiones genéricas en cada una de las cuales se destruía un árbol de Suslin mediante el procedimiento anterior. Esto requiere resultados sobre extensiones iteradas más potentes que los que empleamos para demostrar el teorema de Easton, pues ahora hemos de reducir a una única extensión genérica una sucesión de extensiones respecto a c.p.o.s que no están necesariamente en el modelo base, sino que aparecen gradualmente en los pasos intermedios.

Posteriormente, D.A. Martin se dio cuenta de que el mismo argumento de Solovay y Tennenbaum demostraba en realidad la consistencia de una sentencia mucho más fuerte que la hipótesis de Suslin, y que actualmente se conoce como axioma de Martin (AM). Su interés radica en que tiene una amplia gama de consecuencias, más allá de la hipótesis de Suslin, de modo que, una vez probada la consistencia de AM mediante la teoría de extensiones genéricas, cada vez que demostramos que AM implica una cierta afirmación, estamos probando

la consistencia de dicha afirmación sin necesidad de recurrir para nada a la teoría de extensiones genéricas, por lo que AM proporciona una poderosa técnica de pruebas de consistencia accesible incluso a los no especialistas en teoría de conjuntos.

Dedicamos las primeras secciones a desarrollar la teoría general sobre iteración de extensiones para después presentar el axioma de Martin y demostrar su consistencia. Finalmente mostraremos algunas de sus aplicaciones.

8.1 Productos generalizados

Sabemos que si M es un modelo transitivo numerable de ZFC y \mathbb{P}, \mathbb{Q} son dos c.p.o.s en M , entonces una extensión respecto a \mathbb{P} seguida de una extensión respecto a \mathbb{Q} es equivalente a una única extensión respecto al producto $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$. El problema que abordamos ahora consiste básicamente en partir de un c.p.o. $\mathbb{P} \in M$, de un filtro G \mathbb{P} -genérico sobre M y de un c.p.o. $\mathbb{Q} \in M[G]$. Hemos de reducir una extensión por \mathbb{Q} de $M[G]$ a una única extensión de M . Para ello expresaremos $\mathbb{Q} = \pi_G$ y definiremos un c.p.o. $\mathbb{P} * \pi \in M$ que hará las veces de $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$. En realidad estas ideas han de ser precisadas en varios puntos. En primer lugar probamos un par de resultados técnicos que nos evitarán trabajar con clases propias de nombres.

Teorema 8.1 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre. Entonces existe un ordinal α tal que si σ es un \mathbb{P} -nombre y $\mathbf{1} \Vdash \sigma \in \pi$, entonces existe un \mathbb{P} -nombre $\sigma' \in V_\alpha$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \sigma = \sigma'$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $A = \{\sigma \in V^\mathbb{P} \mid \mathbf{1} \Vdash \sigma \in \pi\}$. No es difícil probar que, salvo en casos triviales, A es una clase propia, aunque no vamos a necesitar este hecho (en realidad es el inconveniente que hace que el teorema no sea trivial).

Para cada par de nombres $\sigma, \tau \in V^\mathbb{P}$, sea $D_{\sigma\tau} = \{p \in \mathbb{P} \mid p \Vdash \sigma = \tau\}$. Definimos $f : A \longrightarrow \mathcal{P}(\mathcal{D}\pi \times \mathcal{P}\mathbb{P})$ mediante

$$f(\sigma) = \{(\tau, D_{\sigma\tau}) \mid \tau \in \mathcal{D}\pi\}.$$

Vamos a ver que si $\sigma, \sigma' \in A$, entonces $\mathbf{1} \Vdash \sigma = \sigma'$ si y sólo si $f(\sigma) = f(\sigma')$. Una implicación es obvia. Respecto a la otra, si $\neg\mathbf{1} \Vdash \sigma = \sigma'$ pero $f(\sigma) = f(\sigma')$, entonces existe una condición $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \Vdash \sigma \neq \sigma'$. Como $\mathbf{1} \Vdash \sigma \in \pi$, existen un $q \leq p$ y un $\tau \in \mathcal{D}\pi$ tales que $q \Vdash \sigma = \tau$, es decir,

$$q \in D_{\sigma\tau} = f(\sigma)(\tau) = f(\sigma')(\tau) = D_{\sigma'\tau},$$

con lo que también $q \Vdash \sigma' = \tau$ y así $q \Vdash \sigma = \sigma'$, mientras que p fuerza lo contrario.

Si escogemos una antiimagen para cada elemento del rango de f , obtenemos un subconjunto B de A tal que para todo $\sigma \in A$ existe un $\sigma' \in B$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \sigma = \sigma'$. Basta tomar un α tal que $B \in V_\alpha$. ■

Definición 8.2 Sea \mathbb{P} un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre. Sea α el mínimo ordinal que cumple el teorema anterior. Llamaremos $\hat{\pi} = \{\sigma \in V_\alpha \mid \sigma \in V^\mathbb{P} \wedge \mathbf{1} \Vdash \sigma \in \pi\}$.

Teorema 8.3 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre.*

- a) *$\hat{\pi}$ es un conjunto de \mathbb{P} -nombres tal que si $\sigma \in \hat{\pi}$ entonces $\mathbf{1} \Vdash \sigma \in \pi$.*
- b) *Si $\hat{\pi} \neq \emptyset$, σ es un \mathbb{P} -nombre y $p \Vdash \sigma \in \pi$, entonces existe un $\sigma' \in \hat{\pi}$ de manera que $p \Vdash \sigma = \sigma'$.*
- c) *En particular si $\phi(x)$ es una fórmula quizá con más variables libres, $\hat{\pi} \neq \emptyset$ y $p \Vdash \forall x \in \pi \phi(x)$ (donde las demás variables de ϕ se interpretan como \mathbb{P} -nombres cualesquiera), existe un $\sigma \in \hat{\pi}$ tal que $p \Vdash \phi(\sigma)$.*

DEMOSTRACIÓN: a) es inmediato por la definición de $\hat{\pi}$.

b) Notemos que $\mathbf{1} \Vdash \forall x \in \pi (\sigma \in \pi \rightarrow \sigma = x)$. Aquí usamos que, como $\hat{\pi} \neq \emptyset$, se cumple que $\mathbf{1} \Vdash \forall x x \in \pi$.

Por el teorema 4.61 existe $\rho \in V^\mathbb{P}$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \rho \in \pi \wedge (\sigma \in \pi \rightarrow \sigma = \rho)$. En particular $\mathbf{1} \Vdash \rho \in \pi$, luego por el teorema anterior existe un $\sigma' \in \hat{\pi}$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \sigma = \sigma'$, de donde también $\mathbf{1} \Vdash (\sigma \in \pi \rightarrow \sigma = \sigma')$. Claramente entonces $p \Vdash \sigma = \sigma'$.

c) Si $p \Vdash \forall x \in \pi \phi(x)$, por 4.61 existe un $\sigma \in \hat{\pi}$ tal que $p \Vdash \sigma' \in \pi \wedge \phi(\sigma')$. Por b) existe un $\sigma \in \hat{\pi}$ tal que $p \Vdash \sigma' = \sigma$, luego $p \Vdash \phi(\sigma)$. ■

En definitiva, $\hat{\pi}$ es un conjunto con nombres suficientes para nombrar a cualquier posible elemento de π en una extensión genérica. Ahora ya podemos definir un producto generalizado entre un c.p.o. y el nombre de otro c.p.o. que no esté necesariamente en el modelo base.

Definición 8.4 Sea \mathbb{P} un c.p.o. Un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. es una terna (π, π', π'') de \mathbb{P} -nombres tales que $\pi'' \in \hat{\pi}$ y $\mathbf{1} \Vdash (\pi, \pi', \pi'')$ es un c.p.o.

En la práctica escribiremos \leq_π o simplemente \leq en lugar de π' y $\mathbf{1}_\pi$ o simplemente $\mathbf{1}$ en lugar de π'' . Si no hay confusión escribiremos π en lugar de $(\pi, \leq_\pi, \mathbf{1}_\pi)$.

Sea \mathbb{P} un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. Definimos $\mathbb{P} * \pi$ como el producto cartesiano $\mathbb{P} \times \hat{\pi}$ con el preorden dado por

$$(p, \sigma) \leq (q, \tau) \leftrightarrow p \leq q \wedge p \Vdash \sigma \leq_\pi \tau.$$

Es fácil ver que el *producto generalizado* $\mathbb{P} * \pi$ es ciertamente un c.p.o. con máximo $\mathbf{1} = (\mathbf{1}, \mathbf{1}_\pi)$. Notemos que el preorden no es antisimétrico (y hemos trabajado en general con c.p.o.s no necesariamente antisimétricos precisamente para incluir esta situación).

Si M es un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. y $\pi \in M$ es un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. M , por simplicidad escribiremos $\hat{\pi}$ en lugar de $\hat{\pi}^M$

y $\mathbb{P} * \pi$ en lugar de $(\mathbb{P} * \pi)^M = \mathbb{P} \times \hat{\pi}^M$, pero hemos de tener presente que estos conceptos no son absolutos.

Aún no es evidente que estos conceptos recojan realmente la situación que queríamos estudiar. Los teoremas siguientes lo ponen de manifiesto.

Teorema 8.5 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y sea π un nombre para un c.p.o. $\hat{\pi}$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y $\mathbb{Q} = \pi_G$. Entonces $(\mathbb{Q}, \leq_{\pi_G}, \mathbf{1}_{\pi_G})$ es un c.p.o. tal que todo $q \in \mathbb{Q}$ es de la forma $q = \sigma_G$, donde $\sigma \in \hat{\pi}$.*

DEMOSTRACIÓN: Notemos que $\hat{\pi} \neq \emptyset$ porque por definición $\mathbf{1}_\pi \in \hat{\pi}$, luego siempre podemos aplicar el teorema 8.3. Sea $q = \rho_G$, para cierto $\rho \in M^\mathbb{P}$. Obviamente $\mathbf{1} \Vdash \forall x \in \pi(\rho \in \pi \rightarrow x = \rho)$. Por 8.3 c) existe $\sigma \in \hat{\pi}$ tal que

$$\mathbf{1} \Vdash (\rho \in \pi \rightarrow \sigma = \rho).$$

En particular esto es cierto en $M[G]$, es decir, $q \in \mathbb{Q} \rightarrow \sigma_G = q$ y por consiguiente $q = \sigma_G$. ■

Todavía falta probar que la definición que hemos dado de nombre para un c.p.o. no es restrictiva, en el sentido de que todo c.p.o. en una extensión genérica admite un nombre en esas condiciones.

Teorema 8.6 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sea $(\mathbb{Q}, \leq_\mathbb{Q}, \mathbf{1}_\mathbb{Q}) \in M[G]$ un c.p.o. Entonces existe un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. $(\pi, \leq_\pi, \mathbf{1}_\pi) \in M$ tal que $\mathbb{Q} = \pi_G$, $\leq_\mathbb{Q} = \leq_{\pi_G}$ y $\mathbf{1}_\mathbb{Q} = \mathbf{1}_{\pi_G}$.*

DEMOSTRACIÓN: Sean $\mathbb{Q} = \rho_G$, $\leq_\mathbb{Q} = \rho'_G$, $\mathbf{1}_\mathbb{Q} = \rho''_G$. Entonces

$$\mathbf{1} \Vdash \forall xyz((x, y, z) \text{ es un c.p.o.} \wedge ((\rho, \rho', \rho'') \text{ es un c.p.o.} \rightarrow (\rho, \rho', \rho'') = (x, y, z))),$$

luego por 4.61 existen $\pi, \pi', \pi'' \in M^\mathbb{P}$ tales que

$$\mathbf{1} \Vdash (\pi, \pi', \pi'') \text{ es un c.p.o.} \wedge ((\rho, \rho', \rho'') \text{ es un c.p.o.} \rightarrow (\rho, \rho', \rho'') = (\pi, \pi', \pi'')).$$

En particular $\mathbf{1} \Vdash \pi'' \in \pi$, luego por 8.3 existe $\mathbf{1}_\pi \in \hat{\pi}$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \pi'' = \mathbf{1}_\pi$. Esto nos permite sustituir π'' por $\mathbf{1}_\pi$ en la fórmula anterior. Llamando $\leq_\pi = \pi'$ tenemos que $(\pi, \leq_\pi, \mathbf{1}_\pi)$ es un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. y

$$\mathbf{1} \Vdash ((\rho, \rho', \rho'') \text{ es un c.p.o.} \rightarrow (\rho, \rho', \rho'') = (\pi, \leq_\pi, \mathbf{1}_\pi)).$$

Obviamente entonces $(\mathbb{Q}, \leq_\mathbb{Q}, \mathbf{1}_\mathbb{Q}) = (\pi_G, \leq_{\pi_G}, \mathbf{1}_{\pi_G})$. ■

Nuestra intención es probar que si, en las condiciones del teorema anterior, tenemos también un filtro H \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G]$, entonces la extensión $M[G][H]$ puede reducirse a una única extensión genérica de M respecto al producto $\mathbb{P} * \pi$. Demostramos un resultado previo:

Teorema 8.7 Sea \mathbb{P} un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. Entonces la aplicación $i : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{P} * \pi$ dada por $i(p) = (p, \mathbf{1}_\pi)$ es una inmersión completa y cumple $i(\mathbf{1}) = \mathbf{1}$.

DEMOSTRACIÓN: Es obvio que i es una inmersión que cumple $i(\mathbf{1}) = \mathbf{1}$. Dado $(p, \sigma) \in \mathbb{P} * \pi$, se cumple que p es una reducción de (p, σ) a \mathbb{P} , pues si $p' \leq p$, entonces $(p', \sigma) \leq (p, \sigma) \wedge (p', \sigma) \leq (p', \mathbf{1})$, luego $i(p')$ es compatible con (p, σ) . ■

Ahora demostramos los dos teoremas fundamentales sobre productos generalizados. Necesitamos la definición siguiente, que generaliza la noción de producto cartesiano de filtros genéricos.

Definición 8.8 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. M . Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y $H \subset \pi_G$. Definimos $G * H = \{(p, \sigma) \in \mathbb{P} * \pi \mid p \in G \wedge \sigma_G \in H\}$.

Teorema 8.9 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sea π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. M e $i \in M$ la inmersión completa natural de \mathbb{P} en $\mathbb{P} * \pi$. Sea K un filtro $\mathbb{P} * \pi$ -genérico sobre M , sea $G = i^{-1}[K]$ y sea $H = \{\sigma_G \mid \sigma \in \hat{\pi} \wedge \forall p \in \mathbb{P} (p, \sigma) \in K\}$. Entonces G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , H es un filtro π_G -genérico sobre $M[G]$, $K = G * H$ y $M[K] = M[G][H]$.

DEMOSTRACIÓN: Como i es una inmersión completa, por 4.39 sabemos que G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Sea $\mathbb{Q} = \pi_G$. También sabemos que \mathbb{Q} es un c.p.o. en $M[G]$. Veamos que H es un filtro en \mathbb{Q} . Como $(\mathbf{1}_\mathbb{P}, \mathbf{1}_\pi) \in K$, se cumple que $\mathbf{1}_\mathbb{Q} = \mathbf{1}_{\pi_G} \in H$.

Sean $\sigma_G \in H$, $\tau_G \in \mathbb{Q}$ tales que $\sigma_G \leq \tau_G$ (podemos suponer que $\sigma, \tau \in \hat{\pi}$). Por definición de H existe $q \in \mathbb{P}$ tal que $(q, \sigma) \in K$. Sea $p \in G$ tal que $p \Vdash \sigma \leq \tau$. Entonces $i(p) = (p, \mathbf{1}) \in K$. Sea $(r, \rho) \in K$ tal que $(r, \rho) \leq (p, \mathbf{1})$ y $(r, \rho) \leq (q, \sigma)$.

Como $r \leq p$ se cumple que $r \Vdash \sigma \leq \tau$ y como $(r, \rho) \leq (q, \sigma)$ también $r \Vdash \rho \leq \sigma$, luego $r \Vdash \rho \leq \tau$, de donde $(r, \rho) \leq (r, \tau)$. Por consiguiente $(r, \tau) \in K$ y $\tau_G \in H$.

Sean ahora $\sigma_G, \tau_G \in H$, es decir, $\sigma, \tau \in \hat{\pi}$ y existen $q, q' \in \mathbb{P}$ tales que $(q, \sigma), (q', \tau) \in K$. Sea $(r, \rho) \in K$ tal que $(r, \rho) \leq (q, \sigma)$ y $(r, \rho) \leq (q', \tau)$. Entonces $(r, \rho) \leq (r, \mathbf{1})$, luego $i(r) = (r, \mathbf{1}) \in K$ y por consiguiente $r \in G$. Como $(r, \rho) \leq (q, \sigma)$, se cumple que $r \Vdash \rho \leq \sigma$, de donde $\rho_G \leq \sigma_G$, e igualmente $\rho_G \leq \tau_G$. Como $(r, \rho) \in K$ se cumple que $\rho_G \in H$.

Seguidamente probamos que H es \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G]$. Para ello tomamos $D \in M[G]$ denso en \mathbb{Q} . Sea $\delta \in M^\mathbb{P}$ tal que $D = \delta_G$. Sea $p \in G$ tal que $p \Vdash \delta$ es denso en π . Sea

$$D' = \{(q, \tau) \in \mathbb{P} * \pi \mid q \Vdash \tau \in \delta\} \in M.$$

Veamos que D' es denso bajo $(p, \mathbf{1})$. Si $(q, \sigma) \leq (p, \mathbf{1})$, entonces $q \leq p$, luego $q \Vdash \delta$ es denso en π . También $q \Vdash \sigma \in \pi$, luego $q \Vdash \forall x \in \pi(x \in \delta \wedge x \leq \sigma)$.

Por 8.3 existe un $\rho \in \hat{\pi}$ tal que $q \Vdash \rho \in \delta \wedge \rho \leq \sigma$. Es claro entonces que $(q, \rho) \in \mathbb{P} * \pi$, $(q, \rho) \leq (q, \sigma)$ y $(q, \rho) \in D'$.

Como $(p, \mathbf{1}) = i(p) \in K$, existe un $(q, \tau) \in K \cap D'$, y así $\tau_H \in H \cap D \neq \emptyset$.

Veamos ahora que $K = G * H$. Si $(p, \sigma) \in K$, entonces $\sigma_G \in H$ y, como $(p, \sigma) \leq (p, \mathbf{1})$ también $(p, \mathbf{1}) \in K$, luego $p \in G$. En consecuencia $(p, \sigma) \in G * H$.

Recíprocamente, si $(p, \sigma) \in G * H$, entonces $p \in G$, $\sigma \in \hat{\pi}$ y $\sigma_G \in H$. Esto último implica que existen $\sigma' \in \hat{\pi}$ y $q \in \mathbb{P}$ de modo que $\sigma_G = \sigma'_G$ y $(q, \sigma') \in K$.

Sea $q' \in G$ tal que $q' \Vdash \sigma = \sigma'$. Entonces $i(q') = (q', \mathbf{1}) \in K$. Sea $(r, \tau) \in K$ tal que $(r, \tau) \leq (q, \sigma')$ y $(r, \tau) \leq (q', \mathbf{1})$. Tenemos que $r \Vdash \tau \leq \sigma'$ y $r \Vdash \sigma = \sigma'$, luego $r \Vdash \tau \leq \sigma$, $(r, \tau) \leq (q, \sigma)$ y $(q, \sigma) \in K$. Ahora $(p, \mathbf{1}) \in K$ y $(q, \sigma) \in K$, luego existe un $(s, \rho) \in K$ tal que $(s, \rho) \leq (p, \mathbf{1})$, $(s, \rho) \leq (q, \sigma)$, con lo que $s \leq p$ y $s \Vdash \rho \leq \sigma$. Por consiguiente $(s, \rho) \leq (p, \sigma)$ y concluimos que $(p, \sigma) \in K$.

Es claro que $G, H \in M[K]$, luego $M[G][H] \subset M[K]$. Así mismo es claro que $K = G * H \in M[G][H]$, luego $M[K] \subset M[G][H]$. Esto nos da la igualdad. ■

Teorema 8.10 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. M . Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , sea $\mathbb{Q} = \pi_G$ y sea H un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G]$. Entonces $K = G * H$ es un filtro $\mathbb{P} * \pi$ -genérico sobre M y los filtros G y H construidos en el teorema anterior a partir de K son los dados. Por lo tanto $M[K] = M[G][H]$.*

DEMOSTRACIÓN: Obviamente $(\mathbf{1}, \mathbf{1}) \in K$.

Tomemos pares $(p, \sigma), (p', \sigma') \in K$. Entonces $p, p' \in G$ y $\sigma_G, \sigma'_G \in H$. Por lo tanto existen $q \in G$ y $h \in H$ tales que $q \leq p$, $q \leq p'$, $h \leq \sigma_G$, $h \leq \sigma'_G$. Por 8.3 se cumple que $h = \tau_G$, con $\tau \in \hat{\pi}$. Sea $q' \in \mathbb{P}$ tal que $q' \Vdash \tau \leq \sigma \wedge \tau \leq \sigma'$. Podemos tomar $q' \leq q$. Entonces $(q', \tau) \in K$, $(q', \tau) \leq (p, \sigma)$ y $(q', \tau) \leq (p', \sigma')$.

Ahora suponemos que $(p, \sigma) \in K$, $(p', \sigma') \in \mathbb{P} * \pi$ y $(p, \sigma) \leq (p', \sigma')$. Entonces $p \in G$ y $p \leq p'$, luego $p' \in G$. Por otra parte $p \Vdash \sigma \leq \sigma'$, luego $\sigma_G \leq \sigma'_G$ y, como $\sigma_G \in H$, también $\sigma'_G \in H$, de donde $(p', \sigma') \in K$.

Para probar que K es genérico tomamos un conjunto $D \in M$ denso en $\mathbb{P} * \pi$. Sea

$$D^* = \{\sigma_G \mid \sigma \in \hat{\pi} \wedge \bigvee p \in G (p, \sigma) \in D\} \in M[G].$$

Vamos a probar que D^* es denso en \mathbb{Q} . Para ello tomamos $q = \tau_G \in \mathbb{Q}$. Podemos suponer que $\tau \in \hat{\pi}$. Definimos

$$D' = \{p \in \mathbb{P} \mid \bigvee \sigma \in \hat{\pi} ((p, \sigma) \in D \wedge p \Vdash \sigma \leq \tau)\} \in M.$$

Se cumple que D' es denso en \mathbb{P} , pues si $t \in \mathbb{P}$, entonces $(t, \tau) \in \mathbb{P} * \pi$, luego existe un $(p, \sigma) \in D$ tal que $(p, \sigma) \leq (t, \tau)$, luego $p \leq t$ y $p \in D'$.

Tomemos, pues, $p \in D' \cap G$. Sea $\sigma \in \hat{\pi}$ tal que $p \Vdash \sigma \leq \tau \wedge (p, \sigma) \in D$. Entonces $\sigma_G \leq \tau_G = q$ y $\sigma_G \in D^*$. Esto prueba la densidad de D^* .

Por consiguiente podemos tomar un $\sigma_G \in D^* \cap H$. Así, existe un $p \in G$ tal que $(p, \sigma) \in D$ y, en consecuencia, $(p, \sigma) \in D \cap K$.

Así queda probado que K es $\mathbb{P} * \pi$ -genérico sobre M . Se comprueba inmediatamente que G y H son los filtros construidos en el teorema anterior a partir de K . ■

Estos teoremas generalizan claramente al teorema del producto que vimos en la sección 5.4.

Ejercicio: Sean \mathbb{P} y \mathbb{Q} dos c.p.o.s. Probar que existe una inmersión densa de $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ en $\mathbb{P} * \mathbb{Q}$.

Conviene explicitar la igualdad $M[K] = M[G][H]$ en términos de nombres:

Definición 8.11 Dado un c.p.o. \mathbb{P} y un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. π , definimos una aplicación $V^{\mathbb{P} * \pi} \rightarrow V^\mathbb{P}$ mediante

$$\sigma^* = \{(\text{p.o.}(\xi^*, \tau), p) \mid (\xi, (p, \tau)) \in \sigma\}.$$

Una simple inducción prueba que $\mathbb{1} \Vdash \sigma^* \in V^\pi$. En efecto, relativizando la prueba a un modelo transitivo numerable M de ZFC, se trata de probar que si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y $\mathbb{Q} = \pi_G$, entonces $\sigma_G^* \in M^\mathbb{Q}$, pero si suponemos que $\xi_G^* \in M^\mathbb{Q}$ por hipótesis de inducción, la conclusión para σ^* es trivial: los elementos de σ_G^* son pares $(\xi_G^*, \tau_G) \in M^\mathbb{Q} \times \mathbb{Q}$.

Teorema 8.12 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y $\pi \in M^\mathbb{P}$ un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , sea $\mathbb{Q} = \pi_G$ y sea H un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G]$. Entonces, para todo $\sigma \in M^{\mathbb{P} * \pi}$ se cumple que $(\sigma_G^*)_H = \sigma_{G * H}$.

DEMOSTRACIÓN: Por inducción sobre σ . Si vale para nombres de rango menor y $u \in (\sigma_G^*)_H$, entonces $u = \epsilon_G$, donde $(\epsilon, q) \in \sigma_G^*$ y $q \in H$. A su vez $(\epsilon, q) = (\xi_G^*, \tau_G)$, donde $(\xi, (p, \tau)) \in \sigma$ y $p \in G$, pero entonces $u = (\xi_G^*)_H = \xi_{G * H}$ y $q = \tau_G \in H$, con $(p, \tau) \in G * H$, luego $u \in \sigma_{G * H}$. La otra inclusión se prueba análogamente. ■

Para probar la consistencia de la hipótesis de Suslin hemos de aplicar estos resultados a c.p.o.s que no son sino posibles árboles de Suslin puestos del revés. En realidad los aplicaremos en un contexto ligeramente distinto, pero siempre a c.p.o.s que cumplen la condición de cadena numerable. Por ello demostramos ahora que las condiciones de cadena se conservan bajo hipótesis naturales al formar productos generalizados. Para ello necesitamos un hecho técnico:

Teorema 8.13 Sea κ un cardinal regular y \mathbb{P} un c.p.o. que cumpla la c.c. κ . Sea $\sigma \in V^\mathbb{P}$ tal que $\mathbb{1} \Vdash (\sigma \subset \check{\kappa} \wedge |\sigma| < \check{\kappa})$. Entonces existe un $\beta < \kappa$ tal que $\mathbb{1} \Vdash \sigma \subset \check{\beta}$.

DEMOSTRACIÓN: Por el teorema de reflexión basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Sea

$$E = \{\alpha < \kappa \mid \forall p \in \mathbb{P} \ p \Vdash \check{\alpha} \text{ es el supremo de } \sigma\} \in M.$$

Por el axioma de elección^M existe $\{p_\alpha\}_{\alpha \in E} \in M$ tal que, para cada $\alpha \in E$ se cumple que $p_\alpha \Vdash \check{\alpha}$ es el supremo de σ . Es claro que si $\alpha \neq \beta$ entonces $p_\alpha \perp p_\beta$, pues ambas condiciones fuerzan fórmulas contradictorias. Así, la aplicación $\alpha \mapsto p_\alpha$ es inyectiva y su imagen es una anticadena en \mathbb{P} . Por hipótesis $|E|^M < \kappa$. Como κ es regular^M, existe un $\beta < \kappa$ tal que $E \subset \beta$.

Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , como \mathbb{P} cumple la c.c. κ en M , tenemos que \mathbb{P} conserva cardinales y cofinalidades $\geq \kappa$, luego κ es un cardinal regular ^{$M[G]$} . Por hipótesis $\sigma_G \subset \kappa$ y $|\sigma_G|^{M[G]} < \kappa$. Por consiguiente, el supremo α de σ_G cumple $\alpha < \kappa$. Existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash \check{\alpha}$ es el supremo de σ , luego $\alpha \in E$ y por tanto $\alpha < \beta$, es decir, $\sigma_G \subset \beta$. ■

Teorema 8.14 *Sea κ un cardinal regular, sea \mathbb{P} un c.p.o. que cumpla la c.c. κ y sea π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. tal que $\mathbb{1} \Vdash \pi$ cumple la c.c. $\check{\kappa}$. Entonces $\mathbb{P} * \pi$ cumple la c.c. κ .*

DEMOSTRACIÓN: Como en el teorema anterior, basta probar la relativización de este teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Supongamos que existe una anticadena en $\mathbb{P} * \pi$ con κ elementos: $\{(p_\alpha, \tau_\alpha)\}_{\alpha < \kappa} \in M$. Sea $\sigma = \{(\check{\alpha}, p_\alpha) \mid \alpha < \kappa\} \in M^\mathbb{P}$. Claramente $\mathbb{1} \Vdash \sigma \subset \check{\kappa}$.

Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces

$$\sigma_G = \{\alpha < \kappa \mid p_\alpha \in G\} \in M[G].$$

Sea $W = \{\tau_{\alpha G} \mid \alpha \in \sigma_G\} \in M[G]$. Veamos que si $\alpha, \beta \in \sigma_G$, $\alpha \neq \beta$, entonces $\tau_{\alpha G} \perp \tau_{\beta G}$. En efecto, supongamos que existe $\rho_G \in \pi_G$ (con $\rho \in \hat{\pi}$) tal que $\rho_G \leq \tau_{\alpha G}$ y $\rho_G \leq \tau_{\beta G}$. Tomemos entonces $q \in G$ tal que $q \Vdash \rho \leq \tau_\alpha \wedge \rho \leq \tau_\beta$. Como $\alpha, \beta \in \sigma_G$, ha de ser $p_\alpha, p_\beta \in G$, luego podemos tomar $q \leq p_\alpha \wedge q \leq p_\beta$. Así $(q, \rho) \leq (p_\alpha, \tau_\alpha) \wedge (q, \rho) \leq (p_\beta, \tau_\beta)$, en contradicción con que estos pares forman parte de una anticadena.

Por hipótesis $|\sigma_G|^{M[G]} = |W|^{M[G]} < \kappa$, pues W es una anticadena en π_G y éste cumple la c.c. κ en $M[G]$.

Con esto hemos probado que $\mathbb{1} \Vdash (\sigma \subset \check{\kappa} \wedge |\sigma| < \check{\kappa})$ y por el teorema anterior existe un $\beta < \kappa$ tal que $\mathbb{1} \Vdash \sigma \subset \check{\beta}$, pero por definición de σ tenemos que $p_\beta \Vdash \check{\beta} \in \sigma$, contradicción. ■

Ejercicio: Probar que si \mathbb{P} y \mathbb{Q} son dos c.p.o.s y κ es un cardinal regular, entonces $\mathbb{P} * \mathbb{Q}$ cumple la c.c. κ si y sólo si \mathbb{P} cumple la c.c. κ y $\mathbb{1}_\mathbb{P} \Vdash \check{\mathbb{Q}}$ cumple la c.c. $\check{\kappa}$.

Podríamos probar un resultado similar para la propiedad de ser κ -cerrado, pero como vamos a trabajar con c.p.o.s con la condición de cadena numerable no nos va a ser necesario.

Veamos ahora un hecho mucho más elemental:

Teorema 8.15 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. separativo y π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. tal que $\mathbb{1} \Vdash \pi$ es separativo. Entonces $\mathbb{P} * \pi$ es separativo.*

DEMOSTRACIÓN: Basta probar el teorema relativizado a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Sean $(p, \sigma), (q, \tau) \in \mathbb{P} * \pi$ tales que la primera no extiende a la segunda. Si $p \not\leq q$, entonces existe $p' \leq p$, $p' \perp q$, con lo que $(p', \sigma) \leq (p, \sigma)$ y $(p', \sigma) \perp (q, \tau)$.

Si $p \leq q$, entonces $\neg p \Vdash \sigma \leq \tau$, luego existe un filtro G \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $\sigma_G \not\leq \tau_G$ y, como π_G es separativo, existe $\sigma'_G \leq \sigma_G$ tal que $\sigma'_G \perp \tau_G$. Podemos suponer que $\sigma' \in \dot{\pi}$. Sea $p' \in G$ tal que $p' \leq p$ y $p' \Vdash \sigma' \leq \sigma \wedge \sigma' \perp \tau$. Entonces $(p', \sigma') \leq (p, \sigma)$ y $(p', \sigma') \perp (q, \tau)$. ■

Cocientes de inmersiones completas Terminamos la sección probando que si $h : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ es una inmersión completa, entonces \mathbb{Q} es equivalente a un producto generalizado $\mathbb{P} * (\mathbb{Q}/\Gamma)$, donde \mathbb{Q}/Γ es un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. definido adecuadamente. Por lo tanto, toda extensión genérica obtenida con \mathbb{Q} puede descomponerse en una extensión genérica obtenida con \mathbb{P} seguida de otra obtenida con el c.p.o. nombrado por \mathbb{Q}/Γ en la extensión.

Definición 8.16 Sea $h : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa entre c.p.o.s. Diremos que $R : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{P}$ es una *restricción* para h si a cada $q \in \mathbb{Q}$ le asigna una reducción de q a \mathbb{P} y además cumple las dos propiedades siguientes:

$$\bigwedge qq' \in \mathbb{Q}(q \leq q' \rightarrow R(q) \leq R(q')), \quad \bigwedge p \in \mathbb{P} R(h(p)) = p.$$

Esto se cumple cuando h es un monomorfismo completo entre álgebras de Boole completas, pues en tal caso basta definir

$$R(q) = \bigwedge \{p \in \mathbb{P} \mid q \leq h(p)\} \in \mathbb{P} \setminus \{\emptyset\},$$

que es una reducción de q a \mathbb{P} , tal y como se ve en la prueba de [TC 10.17].

Por lo tanto, podemos suponer sin pérdida de generalidad que h tiene una restricción, ya que siempre podemos trabajar con las compleciones de los c.p.o.s.

Definición 8.17 Sea $h : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa entre c.p.o.s dotada de una restricción R . Definimos \mathbb{Q}/Γ como un \mathbb{P} -nombre tal que

$$\mathbf{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \mathbb{Q}/\Gamma = \{q \in \check{\mathbb{Q}} \mid R(q) \in \Gamma\}.$$

Similarmente, definimos $\tilde{\leq}$ como un \mathbb{P} -nombre tal que

$$\mathbf{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \tilde{\leq} = \check{\leq} \cap (\mathbb{Q}/\Gamma \times \mathbb{Q}/\Gamma),$$

es decir, que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}}$ fuerza que $\tilde{\leq}$ es la restricción a \mathbb{Q}/Γ del preorden de \mathbb{Q} . De este modo, $(\mathbb{Q}/\Gamma, \tilde{\leq}, \check{\mathbb{Q}})$ es un nombre para un c.p.o. que normalmente abreviaremos a \mathbb{Q}/Γ .

Si tenemos todo esto en un modelo transitivo numerable M de ZFC y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , llamaremos $\mathbb{Q}/G = (\mathbb{Q}/\Gamma)_G$, y entonces en $M[G]$ tenemos que $\mathbb{Q}/G = \{q \in \mathbb{Q} \mid R(q) \in G\}$, considerado como c.p.o. con la restricción del orden de \mathbb{Q} .

Para cada $q \in \mathbb{Q}$, trivialmente $\mathbf{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \bigvee x \in \mathbb{Q}(\check{q} \in \Gamma \rightarrow x = \check{q})$, luego podemos tomar un \mathbb{P} -nombre $\sigma_q \in \widehat{\mathbb{Q}/\Gamma}$ tal que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \check{q} \in \Gamma \rightarrow \sigma_q = \check{q}$.

Teorema 8.18 Si $h : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{Q}$ es una inmersión completa de c.p.o.s, dotada de una restricción, la aplicación $j : \mathbb{Q} \longrightarrow \mathbb{P} * (\mathbb{Q}/\Gamma)$ dada por $j(q) = (R(q), \sigma_q)$ es una inmersión densa de c.p.o.s.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar el teorema relativizado a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Si $q \leq q'$, entonces $R(q) \leq R(q')$ y obviamente $R(q) \Vdash \sigma_q \leq \sigma_{q'}$, pues si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $R(q) \in G$, se cumple que $q \in G$, luego $q' \in G$, luego $\sigma_q = q \leq q' = \sigma_{q'}$. Por consiguiente $j(q) \leq j(q')$.

Por otra parte, si existe $(r, \sigma) \leq (R(q), \sigma_q)$, $(r, \sigma) \leq (R(q'), \sigma_{q'})$, tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $r \in G$. Entonces $R(q), R(q') \in G$, luego $\sigma_G \leq q, \sigma_G \leq q'$, luego $\neg q \perp q'$. Esto prueba que j es una inmersión.

Para probar que es densa tomamos $(p, \sigma) \in \mathbb{P} * (\mathbb{Q}/\Gamma)$ y fijamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$, sea $q = \sigma_G \in \mathbb{Q}/G$, con lo que $R(q) \in G$. Sea $r \in G$ tal que $r \leq p \wedge r \leq R(q) \wedge r \Vdash \sigma = \tilde{q}$. Entonces, como $R(q)$ es una reducción de q a \mathbb{P} , tenemos que $\neg h(r) \perp q$, luego existe un $q' \in \mathbb{Q}$ tal que $q' \leq q \wedge q' \leq h(r)$.

Veamos que $j(q') = (R(q'), \sigma_{q'}) \leq (p, \sigma)$. En efecto, por una parte tenemos que $R(q') \leq R(h(r)) = r \leq p$ y, por otra, si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $R(q') \in G$, también $r \in G$, luego $\sigma_G = q$ y, como $q' \in \mathbb{Q}/G$, tenemos que $(\sigma_{q'})_G = q' \leq q = \sigma_G$, luego $R(q') \Vdash \sigma_{q'} \leq \sigma$. ■

En las condiciones del teorema anterior (relativizadas a un modelo M) podemos considerar además la inmersión completa $i : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{P} * (\mathbb{Q}/\Gamma)$ dada por $i(p) = (p, \mathbf{1})$. Si K es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M , podemos considerar el filtro

$$\hat{j}(K) = \{(p, \sigma) \in \mathbb{P} * (\mathbb{Q}/\Gamma) \mid \forall q \in \mathbb{Q} (R(q), \sigma_q) \leq (p, \sigma)\},$$

que según 4.40 es un filtro $\mathbb{P} * (\mathbb{Q}/\Gamma)$ -genérico sobre M . El teorema 8.9 nos da que $i^{-1}[\hat{j}(K)]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Vamos a comprobar que $i^{-1}[\hat{j}(K)] = h^{-1}[K]$.

En efecto: si $p \in h^{-1}[K]$ entonces $h(p) \in K$, luego $j(h(p)) \in \hat{j}(K)$, es decir, $(p, \sigma_{h(p)}) \in \hat{j}(K)$, luego $(p, \mathbf{1}) \in \hat{j}(K)$, luego $p \in i^{-1}[\hat{j}(K)]$. Esto nos da una inclusión, y la otra se da porque los filtros genéricos son maximales. A su vez, si llamamos $G = h^{-1}[K]$, el teorema 8.9 nos da que

$$H = \{\sigma_G \mid \sigma \in \widehat{\mathbb{Q}/\Gamma} \wedge \forall p \in \mathbb{P} (p, \sigma) \in \hat{j}(K)\}$$

es un filtro \mathbb{Q}/G -genérico sobre $M[G]$. Vamos a ver que $H = K$.

En efecto, si $q \in K$, se cumple que $R(q) \in G$, pues esto equivale a que $h(R(q)) \in K$. Si no fuera así, por 4.18 existiría un $k \in K$ tal que $k \perp h(R(q))$, y podemos exigir que $k \leq q$, luego $R(k) \leq R(q)$ y, como $R(k)$ es una reducción de k , resulta que $h(R(k))$ es compatible con k , luego $h(R(q))$ también, y tenemos una contradicción. Por lo tanto, $q = (\sigma_q)_G$ con $(R(q), \sigma_q) = j(q) \in \hat{j}(K)$, y esto significa que $q \in H$.

Recíprocamente, un elemento de H es de la forma σ_G , donde $(p, \sigma) \in j(K)$, luego existe un $q \in K$ tal que $(R(q), \sigma_q) \in (p, \sigma)$. Como antes concluimos que $R(q) \in G$, luego $q \in \mathbb{Q}/G$, luego $q = (\sigma_q)_G \leq \sigma_G \in K$.

Por consiguiente, el teorema siguiente es un caso particular de 8.9:

Teorema 8.19 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y $h : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa ^{M} de c.p.o.s dotada de una restricción. Si K es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M y $G = h^{-1}[K]$, entonces K es \mathbb{Q}/G -genérico sobre $M[G]$ y se da la igualdad $M[K]_{\mathbb{Q}} = M[G][K]_{\mathbb{Q}/G}$.*

Similarmente, si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y H es un filtro \mathbb{Q}/G -genérico sobre $M[G]$, el teorema 8.10 nos da que $K = G * H$ es un filtro $\mathbb{P}*(\mathbb{Q}/\Gamma)$ -genérico sobre M , luego $j^{-1}[K]$ es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M . Veamos que $j^{-1}[K] = H$.

En efecto, si $q \in j^{-1}[K]$, entonces $j(q) \in G * H$, es decir, $(R(q), \sigma_q) \in G * H$, luego $R(q) \in G$, lo que implica que $q \in \mathbb{Q}/G$, y $q = (\sigma_q)_G \in H$. Esto nos da una inclusión y por genericidad se da la igualdad. Por lo tanto, el teorema siguiente es un caso particular de 8.10:

Teorema 8.20 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y $h : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ una inmersión completa ^{M} de c.p.o.s dotada de una restricción. Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y H es un filtro \mathbb{Q}/G -genérico sobre $M[G]$, entonces H es \mathbb{Q} -genérico sobre M , $G = i^{-1}[H]$ y se da la igualdad $M[H]_{\mathbb{Q}} = M[G][H]_{\mathbb{Q}/G}$.*

8.2 Iteraciones de preórdenes

Los resultados de la sección anterior nos permiten reducir un número finito de extensiones genéricas sucesivas a una única extensión (aunque los c.p.o.s utilizados no estén todos en el modelo de partida). Por conveniencia podemos suponer en primer lugar la extensión trivial producida con el c.p.o. $\mathbb{P}_0 = \{\emptyset\}$ (es trivial porque todos los \mathbb{P} -nombres son canónicos). Un \mathbb{P}_0 -nombre para un c.p.o. es de la forma $\pi_0 = \check{\mathbb{Q}}$, donde \mathbb{Q} es un cierto c.p.o. en el modelo base. El producto $\mathbb{P}_1 = \mathbb{P}_0 * \pi_0$ es equivalente a \mathbb{Q} , en el sentido de que hay una inmersión densa natural de \mathbb{Q} en \mathbb{P}_1 . Ahora tomamos un \mathbb{P}_1 -nombre π_1 para un c.p.o. y formamos el producto $\mathbb{P}_2 = \mathbb{P}_1 * \pi_1 = (\mathbb{P}_0 * \pi_0) * \pi_1$. Tomamos un \mathbb{P}_2 -nombre π_2 para un c.p.o. y formamos el producto $\mathbb{P}_3 = \mathbb{P}_2 * \pi_2 = ((\mathbb{P}_0 * \pi_0) * \pi_1) * \pi_2$, y así sucesivamente.

Notemos que un elemento de \mathbb{P}_3 es de la forma $(\emptyset, \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2)$. A la hora de generalizar esta construcción a un producto infinito conviene sustituir las n -tuplas que se obtienen de este modo por sucesiones, de modo que podemos identificar a la cuádrupla $(\emptyset, \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2)$ con la sucesión $\{(0, \sigma_0), (1, \sigma_1), (2, \sigma_2)\}$. Esto no supone más que pasar de un c.p.o. a otro semejante. De este modo, la generalización al caso infinito consiste esencialmente en considerar sucesiones transfinitas en lugar de sucesiones finitas. En realidad en los términos correspondientes a ordinales límite tenemos cierta libertad de decisión, tal y como se refleja en la definición siguiente:

Definición 8.21 Sea α un ordinal. Una *iteración de preórdenes* de longitud α es un par $(\{(\mathbb{P}_\delta, \leq_{\mathbb{P}_\delta}, \mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta})\}_{\delta \leq \alpha}, \{(\pi_\delta, \leq_{\pi_\delta}, \mathbf{1}_{\pi_\delta})\}_{\delta < \alpha})$ que cumpla las condiciones siguientes:

- a) Cada $(\mathbb{P}_\delta, \leq_{\mathbb{P}_\delta}, \mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta})$ es un c.p.o. cuyos elementos son funciones de dominio δ , de modo que si $\delta < \epsilon \leq \alpha$ y $p \in \mathbb{P}_\epsilon$, entonces $p|_\delta \in \mathbb{P}_\delta$. En particular $\mathbb{P}_0 = \{\emptyset\}$.
- b) Cada $(\pi_\delta, \leq_{\pi_\delta}, \mathbf{1}_{\pi_\delta})$ es un \mathbb{P}_δ -nombre para un c.p.o. Si $p \in \mathbb{P}_\delta$, se cumple

$$\bigwedge \epsilon < \delta p(\epsilon) \in \hat{\pi}_\epsilon \quad \text{y} \quad \bigwedge \epsilon < \delta \mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta}(\epsilon) = \mathbf{1}_{\pi_\epsilon}.$$

- c) Si p es una función de dominio $\delta + 1$,

$$p \in \mathbb{P}_{\delta+1} \leftrightarrow p|_\delta \in \mathbb{P}_\delta \wedge p(\delta) \in \hat{\pi}_\delta.$$

Si $p, p' \in \mathbb{P}_{\delta+1}$, entonces

$$p \leq p' \leftrightarrow p|_\delta \leq p'_\delta \wedge p|_\delta \Vdash p(\delta) \leq_{\pi_\delta} p'(\delta).$$

- d) Si $\lambda \leq \alpha$ es un ordinal límite se da una de las posibilidades siguientes, donde, en general, si p es una función de dominio δ llamaremos *soporte* de p al conjunto $\text{sop } p = \{\epsilon < \delta \mid p(\epsilon) \neq \mathbf{1}_{\pi_\epsilon}\}$.

1. Para toda función p de dominio λ

$$p \in \mathbb{P}_\lambda \leftrightarrow \bigwedge \delta < \lambda p|_\delta \in \mathbb{P}_\delta \wedge |\text{sop } p| < \aleph_0.$$

En tal caso diremos que \mathbb{P}_λ es el *límite directo* del sistema $\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta < \lambda}$.

2. Para toda función p de dominio λ

$$p \in \mathbb{P}_\lambda \leftrightarrow \bigwedge \delta < \lambda p|_\delta \in \mathbb{P}_\delta \wedge |\text{sop } p| < \aleph_1.$$

3. Para toda función p de dominio λ

$$p \in \mathbb{P}_\lambda \leftrightarrow \bigwedge \delta < \lambda p|_\delta \in \mathbb{P}_\delta.$$

En tal caso diremos que \mathbb{P}_λ es el *límite inverso* del sistema $\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta < \lambda}$.

En cualquiera de los tres casos, si $p, p' \in \mathbb{P}_\lambda$, entonces

$$p \leq p' \leftrightarrow \bigwedge \delta < \lambda p|_\delta \leq p'|_\delta.$$

Notemos que la condición c) afirma que la aplicación $p \mapsto (p|_\delta, p(\delta))$ es una semejanza entre $\mathbb{P}_{\delta+1}$ y $\mathbb{P}_\delta * \pi_\delta$. En la práctica, para definir una iteración de preórdenes sólo hemos de determinar π_δ supuestos definidos $\{\mathbb{P}_\epsilon\}_{\epsilon \leq \delta}$ y $\{\pi_\epsilon\}_{\epsilon < \delta}$ y especificar qué tipo de límite se toma en cada ordinal límite.

Las iteraciones en las que todos los P_λ cumplen 1. (resp. 2) se llaman *iteraciones con soportes finitos* (resp. *numerables*). Observemos que una iteración

tiene soportes finitos si y sólo si para todo λ y toda función p de dominio λ se cumple $p \in \mathbb{P}_\lambda \leftrightarrow \bigwedge \delta < \lambda p|_\delta \in \mathbb{P}_\delta \wedge \bigvee \delta < \lambda \text{sop } p \subset \delta$.

En las condiciones de la definición anterior, si $\epsilon \leq \delta \leq \alpha$, definimos la aplicación $i_{\epsilon\delta} : \mathbb{P}_\epsilon \longrightarrow \mathbb{P}_\delta$ de modo que si $p \in \mathbb{P}_\epsilon$ entonces

$$i_{\epsilon\delta}(p)|_\epsilon = p \wedge \bigwedge \gamma (\epsilon \leq \gamma < \delta \rightarrow i_{\epsilon\delta}(p)(\gamma) = \mathbf{1}|_{\pi_\gamma}).$$

Una simple inducción sobre δ prueba que, en efecto, $i_{\epsilon\delta}(p) \in \mathbb{P}_\delta$. Notemos que $i_{\delta\delta}$ es la identidad y que $i_{\delta\delta+1}$ se corresponde a través de la semejanza $\mathbb{P}_{\delta+1} \cong \mathbb{P}_\delta * \pi_\delta$ con la inmersión completa natural $p \mapsto (p, \mathbf{1})$.

Veamos ahora algunas propiedades elementales de las iteraciones de preórdenes.

Teorema 8.22 *Sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$ una iteración de preórdenes y consideremos ordinales $\epsilon \leq \delta \leq \gamma \leq \alpha$.*

- a) $i_{\epsilon\gamma} = i_{\epsilon\delta} \circ i_{\delta\gamma}$.
- b) $i_{\epsilon\delta}(\mathbf{1}|_{\mathbb{P}_\epsilon}) = \mathbf{1}|_{\mathbb{P}_\delta}$.
- c) $\bigwedge pp' \in \mathbb{P}_\delta (p \leq p' \rightarrow p|_\epsilon \leq p'|_\epsilon)$.
- d) $\bigwedge pp' \in \mathbb{P}_\epsilon (p \leq p' \leftrightarrow i_{\epsilon\delta}(p) \leq i_{\epsilon\delta}(p'))$.
- e) $\bigwedge pp' \in \mathbb{P}_\delta (p|_\epsilon \perp p'|_\epsilon \rightarrow p \perp p')$.
- f) $\bigwedge pp' \in \mathbb{P}_\delta (\text{sop } p \cap \text{sop } p' \subset \epsilon \rightarrow (p|_\epsilon \perp p'|_\epsilon \leftrightarrow p \perp p'))$.
- g) $\bigwedge pp' \in \mathbb{P}_\epsilon (p \perp p' \leftrightarrow i_{\epsilon\delta}(p) \perp i_{\epsilon\delta}(p'))$.
- h) $i_{\epsilon\delta} : \mathbb{P}_\epsilon \longrightarrow \mathbb{P}_\delta$ es una inmersión completa.

DEMOSTRACIÓN: a) y b) son inmediatas, c) y d) se prueban fácilmente por inducción sobre δ , e) es consecuencia de c).

Una implicación de f) se da por e), luego sólo hemos de probar que si $p \perp p'$ entonces $p|_\epsilon \perp p'|_\epsilon$. Supongamos que existe $p'' \in \mathbb{P}_\epsilon$ tal que $p'' \leq p|_\epsilon$ y $p'' \leq p'|_\epsilon$. Sea p^* la función de dominio δ dada por $p^*|_\epsilon = p''$ y, para todo ordinal γ tal que $\epsilon \leq \gamma < \delta$

$$p^*(\gamma) = \begin{cases} p(\gamma) & \text{si } \gamma \in \text{sop } p, \\ p'(\gamma) & \text{si } \gamma \in \text{sop } p', \\ \mathbf{1}_{\pi_\gamma} & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

La hipótesis sobre los soportes hace que p^* esté bien definida y una simple inducción sobre γ demuestra que si $\epsilon \leq \gamma \leq \delta$ entonces

$$p^*|_\gamma \in \mathbb{P}_\gamma \wedge p^*|_\gamma \leq p|_\gamma \wedge p^*|_\gamma \leq p'|_\gamma.$$

En particular $p^* \in \mathbb{P}_\delta \wedge p^* \leq p \wedge p^* \leq p'$, luego p y p' son compatibles.

g) es un caso particular de f), pues $\text{sop } i_{\epsilon\delta}(p) = \text{sop } p \subset \epsilon$.

h) Por d) y g) tenemos que $i_{\epsilon\delta}$ es una inmersión. Si $p \in \mathbb{P}_\delta$ entonces $p|_\epsilon$ es una reducción de p a \mathbb{P}_ϵ , pues si $q \leq p|_\epsilon$ entonces $i_{\epsilon\delta}(q)|_\epsilon = q$, luego $\neg i_{\epsilon\delta}(q)|_\epsilon \perp p|_\epsilon$ y, por f), $\neg i_{\epsilon\delta}(q) \perp p$. ■

Es inmediato comprobar que las iteraciones de preórdenes dan lugar a sucesiones transfinitas de extensiones genéricas:

Teorema 8.23 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, y consideremos una iteración de preórdenes $^M(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$. Sea G un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M . Para cada $\delta \leq \alpha$ sea $G_\delta = i_{\delta\alpha}^{-1}[G]$. Entonces G_δ es un filtro \mathbb{P}_δ -genérico sobre M y si $\delta \leq \epsilon \leq \alpha$ entonces $M[G_\delta] \subset M[G_\epsilon]$. Además si llamamos $\mathbb{Q}_\delta = \pi_{\delta G_\delta} \in M[G_\delta]$ y $H_\delta = \{\rho_{G_\delta} \mid \rho \in \hat{\pi}_\delta \wedge \forall p \in \mathbb{P}_\delta \ p \cup \{(\delta, \rho)\} \in G_{\delta+1}\}$, entonces tenemos que \mathbb{Q}_δ es un c.p.o., H_δ es un filtro \mathbb{Q}_δ -genérico sobre $M[G_\delta]$ y $M[G_{\delta+1}] = M[G_\delta][H_\delta]$.*

DEMOSTRACIÓN: Como $i_{\delta\alpha} \in M$ es una inmersión completa, el teorema 4.39 nos da que G_δ es \mathbb{P}_δ -genérico sobre M . Evidentemente, $G_\delta = i_{\delta\epsilon}^{-1}[G_\epsilon]$, luego este mismo teorema nos da la inclusión $M[G_\delta] \subset M[G_\epsilon]$.

Se cumple que \mathbb{Q}_δ es un c.p.o. por la definición de buen nombre para un c.p.o. Claramente H_δ se corresponde a través de la semejanza $\mathbb{P}_{\delta+1} \cong \mathbb{P}_\delta * \pi_\delta$ con el filtro considerado en el teorema 8.9, luego H_δ es un filtro \mathbb{Q}_δ -genérico sobre $M[G_\delta]$ y $M[G_{\delta+1}] = M[G_\delta][H_\delta]$. ■

Así pues, en las condiciones del teorema anterior tenemos una sucesión de extensiones genéricas

$$M = M[G_0] \subset M[G_1] \subset M[G_2] \subset \cdots \subset M[G_\omega] \subset M[G_{\omega+1}] \subset \cdots$$

de modo que cada $M[G_{\delta+1}]$ es una extensión genérica de $M[G_\delta]$.

Notemos que si \mathbb{P}_λ es límite directo de los c.p.o.s anteriores, entonces

$$\mathbb{P}_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} i_{\delta\lambda}[\mathbb{P}_\delta] \quad \text{y} \quad G_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} i_{\delta\lambda}[G_\delta].$$

Podría conjeturarse que $M[G_\lambda] = \bigcup_{\delta < \lambda} M[G_\delta]$, pero esto es falso incluso en los casos más simples. Lo máximo que tenemos a este respecto es el teorema siguiente:

Teorema 8.24 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\lambda \in M$ un ordinal límite y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \lambda}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \lambda})$ una iteración de preórdenes en M tal que las condiciones de \mathbb{P}_λ tengan soportes finitos o numerables (y en el segundo caso suponemos (cf $\lambda > \aleph_0$) $^{M[G]}$). Sea G un filtro \mathbb{P}_λ -genérico sobre M . Supongamos que $S \in M$, $X \in M[G]$, $X \subset S$ y $(|X| < \text{cf } \lambda)^{M[G]}$. Entonces existe un $\delta < \lambda$ tal que $X \in M[G_\delta]$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\xi \in M^{\mathbb{P}_\lambda}$ tal que $X = \xi_G$. Para cada $s \in X$, existe un $p_s \in G$ tal que $p_s \Vdash \check{s} \in \xi$, de modo que $\{p_s\}_{s \in X} \in M[G]$. Por hipótesis tenemos que $|\text{sop } p_s| < \text{cf } \lambda$ y a su vez

$$\bigcup_{s \in X} \text{sop } p_s \subset \lambda$$

tiene cardinal menor que $\text{cf } \lambda$ (porque $\text{cf } \lambda$ es un cardinal regular). Por consiguiente, existe un $\delta < \lambda$ que contiene a todos los soportes de todos los p_s . Sea

$$\tau = \{(\check{s}, p) \mid s \in S \wedge p \in \mathbb{P}_\lambda \wedge \text{sop } p \subset \delta \wedge p \Vdash \check{s} \in \xi\} \in M^{\mathbb{P}_\lambda}.$$

Se cumple que $\tau_G = X$, pues, por una parte, si $s \in X$ entonces $(\check{s}, p_s) \in \tau$, luego $s \in \tau_G$ y, recíprocamente, si $s \in \tau_G$ existe un $p \in G$ tal que $(\check{s}, p) \in \tau$, luego $p \Vdash \check{s} \in \xi$, luego $s \in \xi_G = X$.

Y es claro que existe $\tau^* \in M^{\mathbb{P}_\delta}$ tal que $\tau = i_{\delta\lambda}(\tau^*)$, con lo que podemos concluir que $X = \xi_G = \xi_{G_\delta}^* \in M[G_\delta]$. ■

Por otro lado, tenemos el siguiente resultado general sobre los filtros correspondientes a ordinales límite:

Teorema 8.25 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\lambda \in M$ un ordinal límite y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \lambda}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \lambda})$ una iteración de preórdenes en M . Sea G un filtro \mathbb{P}_λ -genérico sobre M . Entonces, para toda condición $p \in \mathbb{P}_\lambda$, se cumple que $p \in G \leftrightarrow \bigwedge \delta < \lambda p|_\delta \in G_\delta$.*

DEMOSTRACIÓN: Es fácil ver que $p \leq i_{\delta\lambda}(p|_\delta)$, y de aquí se sigue una implicación. Supongamos que se cumple $\bigwedge \delta < \lambda p|_\delta \in G_\delta$ pero $p \notin G$. Sea $q \in G$ tal que

$$q \Vdash \bigwedge \delta < \lambda \check{p}|_\delta \in \Gamma_\delta \wedge \check{p} \notin \Gamma.$$

Claramente, $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \bigvee r \in \pi_\delta (r \leq q(\delta) \wedge (r \leq p(\delta) \vee r \perp p(\delta)))$, pues si $p(\delta)$ y $q(\delta)$ son incompatibles basta tomar $r = q(\delta)$, y en caso contrario tomamos una extensión común. Por lo tanto existe $r(\delta) \in \hat{\pi}_\delta$ tal que

$$\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash r(\delta) \leq q(\delta) \wedge (r(\delta) \leq p(\delta) \vee r(\delta) \perp p(\delta)).$$

Podemos exigir que $r(\delta) = \mathbf{1}_{\pi_\delta}$ siempre que $\delta \notin \text{sop } p \cup \text{sop } q$, con lo que r tiene soporte finito o numerable si lo tienen p y q . Por consiguiente, $r \in \mathbb{P}_\lambda$. Claramente $r \leq q$. Veamos ahora que $r|_\delta \Vdash r(\delta) \leq p(\delta)$ para todo $\delta < \lambda$.

En caso contrario existe un filtro genérico G_δ tal que $r|_\delta \in G_\delta$ pero no $r(\delta)_{G_\delta} \leq p(\delta)_{G_\delta}$, pero entonces $r(\delta)_{G_\delta} \perp p(\delta)_{G_\delta}$, por la construcción de r , luego existe $r'_0 \leq r|_\delta$ tal que $r'_0 \Vdash r(\delta) \perp p(\delta)$. Sea $r' \in \mathbb{P}_\lambda$ dado por

$$r'(\alpha) = \begin{cases} r'_0(\alpha) & \text{si } \alpha < \delta, \\ r(\alpha) & \text{si } \delta \leq \alpha < \lambda. \end{cases}$$

Es claro que $r' \leq r \leq q$, luego si G es un filtro \mathbb{P}_λ -genérico que contenga a r' , también $q \in G$, luego $r|_{\delta+1}, q|_{\delta+1} \in G_{\delta+1}$, pero $r'_0 = r'|_\delta \in G_\delta$, luego $r(\delta)_{G_\delta} \perp p(\delta)_{G_\delta}$, luego $r|_{\delta+1} \perp p|_{\delta+1}$, luego $p|_{\delta+1} \notin G_{\delta+1}$, en contra de la elección de q .

Así pues, $r \leq p$, luego si G es un filtro \mathbb{P}_λ -genérico sobre M tal que $r \in G$, también $p, q \in G$, mientras que $q \Vdash \check{p} \notin \Gamma$, contradicción. ■

Ahora generalizamos el teorema 8.14 sobre condiciones de cadena a iteraciones de preórdenes.

Teorema 8.26 Sea κ un cardinal regular no numerable y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$ una iteración de preórdenes con soportes finitos tal que para todo $\delta < \alpha$ se cumpla que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ cumple la c.c. $\check{\kappa}$. Entonces para todo $\delta \leq \alpha$ tenemos que \mathbb{P}_δ cumple la c.c. κ .

DEMOSTRACIÓN: Lo probamos por inducción sobre δ . Es obvio que $\mathbb{P}_0 = \{\mathbf{1}\}$ cumple la c.c. κ . Si la cumple \mathbb{P}_δ también la cumple $\mathbb{P}_{\delta+1}$ por 8.14. Supongamos que $\lambda \leq \alpha$ es un ordinal límite tal que todos los \mathbb{P}_δ con $\delta < \lambda$ cumplen la c.c. κ .

Si $\{p_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ es una anticadena en \mathbb{P}_λ , o bien la familia de los soportes tiene cardinal menor que κ , en cuyo caso existe $A \subset \kappa$ tal que $|A| = \kappa$ y todas las condiciones $\{p_\alpha\}_{\alpha \in A}$ tienen el mismo soporte $r \subset \lambda$; o bien la familia de los soportes tiene cardinal κ , en cuyo caso podemos aplicarle el lema de los sistemas Δ (es una familia no numerable de conjuntos finitos) de modo que existe $A \subset \kappa$, con $|A| = \kappa$, y la familia $\{\text{sop } p_\alpha\}_{\alpha \in A}$ es cuasidisjunta de raíz $r \subset \lambda$.

En cualquiera de los dos casos tenemos una familia $\{p_\alpha\}_{\alpha \in A}$ de condiciones de \mathbb{P}_λ tal que si $\alpha, \beta \in A$, $\alpha \neq \beta$, entonces $\text{sop } p_\alpha \cap \text{sop } p_\beta = r$.

Sea $\delta < \lambda$ tal que $r \subset \delta$. Entonces por 8.22 f) tenemos que $\{p_\alpha|_\delta\}_{\alpha \in A}$ es una anticadena en \mathbb{P}_δ de cardinal κ , en contra de la hipótesis de inducción. ■

Generalizamos también el teorema 8.15:

Teorema 8.27 Sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$ una iteración de preórdenes tal que para todo $\delta < \alpha$ se cumpla que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es separativo. Entonces para todo $\delta \leq \alpha$ tenemos que \mathbb{P}_δ es separativo.

DEMOSTRACIÓN: Por inducción sobre δ . Trivialmente $\mathbb{P}_0 = \{\mathbf{1}\}$ es separativo. Si \mathbb{P}_δ es separativo, entonces $\mathbb{P}_{\delta+1} \cong \mathbb{P}_\delta * \pi_\delta$ es separativo por 8.15. Supongamos ahora que \mathbb{P}_δ es separativo para todo $\delta < \lambda \leq \alpha$.

Si $p, q \in \mathbb{P}_\lambda$ cumplen $p \not\leq q$, entonces existe un $\delta < \lambda$ tal que $p|_\delta \not\leq q|_\delta$. Por hipótesis de inducción existe $p' \in \mathbb{P}_\delta$ tal que $p' \leq p|_\delta$ y $p' \perp q|_\delta$. Definimos

$$\bar{p}(\epsilon) = \begin{cases} p'(\epsilon) & \text{si } \epsilon < \delta, \\ p(\epsilon) & \text{si } \delta \leq \epsilon < \lambda. \end{cases}$$

Es claro entonces que $\bar{p} \in \mathbb{P}_\lambda$ (tanto si para pertenecer a \mathbb{P}_λ se exigen soportes finitos, como numerables como arbitrarios) así como que $\bar{p} \leq p$ y $\bar{p} \perp q$. ■

Con esto podríamos demostrar ya la consistencia de la hipótesis de Suslin, pero, según hemos indicado, demostraremos la consistencia de una sentencia más general que presentamos en la sección siguiente. Terminamos esta sección probando que toda iteración de c.p.o.s con soportes finitos se puede descomponer en dos iteraciones sucesivas.

Factorización de iteraciones Hasta el final de la sección fijamos un modelo transitivo numerable M de ZFC y, en M , una iteración $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$.

Si $\alpha \leq \gamma$, tenemos que $i_{\alpha\gamma} : \mathbb{P}_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}_\gamma$ es una inmersión completa, y la aplicación $p \mapsto p|_\gamma$ es una restricción en el sentido de 8.16. Por lo tanto,

tenemos definido el nombre para un c.p.o. dado por 8.17, que en este caso representaremos por $\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha$ y que está caracterizado por que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha = \{p \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \mid p|_{\dot{\alpha}} \in \Gamma\}.$$

Si G_α es un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M , llamaremos $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha = (\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha)_{G_\alpha}$, y entonces en $M[G_\alpha]$ tenemos que $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha = \{p \in \mathbb{P}_\gamma \mid p|_\alpha \in G_\alpha\}$, considerado como c.p.o. con la restricción del orden de \mathbb{P}_γ .

Si $\bar{p} \in \mathbb{P}_\gamma$, llamaremos \bar{p} al nombre que en 8.17 hemos llamado σ_p , de modo que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash (\bar{p}|_{\dot{\alpha}} \in \Gamma \rightarrow \bar{p} = \dot{p}),$$

Definimos $i : \mathbb{P}_\gamma \longrightarrow \mathbb{P}_\alpha * (\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha)$ mediante $i(p) = (p|_\alpha, \bar{p})$, y así el teorema 8.18 se particulariza al resultado siguiente:

Teorema 8.28 *La aplicación $i : \mathbb{P}_\gamma \longrightarrow \mathbb{P}_\alpha * (\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha)$ es una inmersión densa.*

A su vez, los teoremas 8.19 y 8.20 se particularizan a:

Teorema 8.29 *Si G_γ es un filtro \mathbb{P}_γ -genérico sobre M , entonces $G_\alpha = i_{\alpha\gamma}^{-1}[G_\gamma]$ es un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M y G_γ también es un filtro $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ y se da la igualdad $M[G_\gamma] = M[G_\alpha][G_\gamma]$.*

Teorema 8.30 *Si G_α es un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M y G_γ es un filtro $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$, entonces G_γ es también un filtro \mathbb{P}_γ -genérico sobre M y $G_\alpha = i_{\alpha\gamma}^{-1}[G_\gamma]$.*

Finalmente probamos que estas factorizaciones permiten factorizar la iteración completa:

Teorema 8.31 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y, en M , sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de longitud $\gamma = \alpha + \beta$ con soportes finitos y sea G_α un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M . Entonces en $M[G_\alpha]$ existe una iteración de c.p.o.s $(\{\mathbb{P}'_\delta\}_{\delta \leq \beta}, \{\pi'_\delta\}_{\delta < \beta})$ con soportes finitos y una familia de inmersiones densas $j_{\alpha\delta} : \mathbb{P}_{\alpha+\delta}/G_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}'_\delta$ tales que si G'_δ es un filtro \mathbb{P}'_δ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ y $G_{\alpha+\delta} = j_{\alpha\delta}^{-1}[G'_\delta]$, entonces $(\pi'_\delta)_{G'_\delta} = (\pi_{\alpha+\delta})_{G_{\alpha+\delta}}$.*

DEMOSTRACIÓN: Construimos recurrentemente la iteración y las inmersiones densas, que además cumplirán que si $\epsilon < \delta$, entonces $j_{\alpha\delta}(p)|_\epsilon = j_{\alpha\epsilon}(p|_{\alpha+\epsilon})$ y $j_{\alpha\delta}(p)(\epsilon) = \mathbb{1}$ si y sólo si $p(\alpha + \epsilon) = \mathbb{1}$. Observemos que, en particular, esto implica que el diagrama siguiente es comutativo:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha & \xrightarrow{j_{\alpha\epsilon}} & \mathbb{P}'_\epsilon \\ i_{\alpha+\delta, \alpha+\epsilon} \uparrow & & \uparrow i_{\delta\epsilon} \\ \mathbb{P}_{\alpha+\delta}/G_\alpha & \xrightarrow{j_{\alpha\delta}} & \mathbb{P}'_\delta \end{array}$$

Para $\delta = 0$ tomamos $\mathbb{P}'_0 = \{\emptyset\}$ y definimos $j_{\alpha 0} : \mathbb{P}_\alpha/G_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}'_0$ como la aplicación constante. Observamos que $\mathbb{P}_\alpha/G_\alpha = G_\alpha$, por lo que todas las condiciones son compatibles, por lo que $j_{\alpha 0}$ es trivialmente una inmersión y obviamente es densa.

Supongamos definida $(\{\mathbb{P}'_\delta\}_{\delta \leq \epsilon}, \{\pi'_\delta\}_{\delta < \epsilon})$, para $\epsilon < \beta$, junto con la inmersión $j_{\alpha \epsilon} : \mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}'_\epsilon$.

Observemos que si $\sigma \in M^{\mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}}$, entonces $i_{\alpha \epsilon}(\sigma)$ es un $\mathbb{P}_\alpha*(\mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha)$ -nombre, luego, usando 8.11, $i_{\alpha \epsilon}(\sigma)_{G_\alpha}^*$ es un $\mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha$ -nombre, que a su vez determina el \mathbb{P}'_ϵ -nombre $\bar{\sigma} = j_{\alpha \epsilon}(i_{\alpha \epsilon}(\sigma)_{G_\alpha}^*)$.

Este nombre tiene la propiedad de que si H' es un filtro \mathbb{P}'_ϵ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ y $H = j_{\alpha \epsilon}^{-1}[H']$, que es un filtro $\mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ y también $\mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}$ -genérico sobre M , entonces $\bar{\sigma}_{H'} = \sigma_H$.

En particular, podemos definir $\pi'_\epsilon = \bar{\pi}_{\alpha+\epsilon}$, de modo que $(\pi'_\epsilon)_{H'} = (\pi_{\alpha+\epsilon})_H$ es un c.p.o., por lo que π'_ϵ es un \mathbb{P}'_ϵ -nombre para un c.p.o., lo que determina a su vez un c.p.o. $\mathbb{P}'_{\epsilon+1}$ y así tenemos la iteración $(\{\mathbb{P}'_\delta\}_{\delta \leq \epsilon+1}, \{\pi'_\delta\}_{\delta < \epsilon+1})$.

Ahora definimos $j_{\alpha, \epsilon+1} : \mathbb{P}_{\alpha+\epsilon+1}/G_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}'_{\epsilon+1}$ mediante

$$j_{\alpha, \epsilon+1}(p)|_\epsilon = i_{\alpha \epsilon}(p|_{\alpha+\epsilon}), \quad j_{\alpha, \epsilon+1}(p)(\epsilon) = \overline{p(\alpha + \epsilon)}.$$

Notemos que, como $\mathbb{1} \Vdash p(\alpha + \epsilon) \in \pi_{\alpha+\epsilon}$, también¹ $\mathbb{1} \Vdash j_{\alpha, \epsilon+1}(\epsilon) \in \pi'_\epsilon$, luego ciertamente $j_{\alpha, \epsilon+1}(p) \in \mathbb{P}'_\epsilon$.

Se comprueba sin dificultad que $p \leq q \rightarrow i_{\alpha, \epsilon+1}(p) \leq i_{\alpha, \epsilon+1}(q)$. Similarmente, si $p \perp q$, entonces, o bien $p|_{\alpha+\epsilon} \perp q|_{\alpha+\epsilon}$, o bien existe $r \leq p|_{\alpha+\epsilon}$, $r \leq q|_{\alpha+\epsilon}$ tal que $r \Vdash p(\alpha + \epsilon) \perp q(\alpha + \epsilon)$ y es fácil ver que esto implica que $j_{\alpha+\epsilon+1}(p)|_\epsilon \perp j_{\alpha+\epsilon+1}(p)|_\epsilon$ o bien $j_{\alpha+\epsilon}(r) \Vdash j_{\alpha+\epsilon+1}(p)(\epsilon) \perp j_{\alpha+\epsilon+1}(q)(\epsilon)$, y en ambos casos $j_{\alpha+\epsilon+1}(p) \perp j_{\alpha+\epsilon+1}(q)$.

Por lo tanto, $j_{\alpha+\epsilon+1}$ es una inmersión. Además es densa, pues si $p' \in \mathbb{P}'_{\epsilon+1}$, entonces $p'|_\epsilon \in \mathbb{P}_\epsilon$, luego por hipótesis de inducción existe $p_0 \in \mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha$ tal que $j_{\alpha \epsilon}(p_0) \leq p'|_\epsilon$. Por otra parte, $p'(\epsilon) \in M^{\mathbb{P}'_\epsilon}$, luego podemos considerar el $\mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha$ -nombre $\sigma = j_{\alpha \epsilon}^{-1}(p'(\epsilon))$ considerado en el teorema 4.42, que es también un $\mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}$ -nombre y, como $\mathbb{1} \Vdash p'(\epsilon) \in \pi'_\epsilon$, es claro que también $\mathbb{1} \Vdash \sigma \in \pi_{\alpha+\epsilon}$. Por lo tanto, podemos formar una condición $p \in \mathbb{P}_{\alpha+\epsilon+1}/G_\alpha$ haciendo que $p|_{\alpha+\epsilon} = p_0$ y $p(\alpha + \epsilon) = \sigma$.

Observemos que $\mathbb{1} \Vdash \bar{\sigma} = p'(\epsilon)$, pues si tomamos un filtro genérico H' , se cumple que $\bar{\sigma}_{H'} = j_{\alpha \epsilon}^{-1}(p'(\epsilon))_H = p'(\epsilon)_{H'}$, por 4.42. Es claro entonces que $j_{\alpha+\epsilon+1}(p) \leq p'$, luego la inmersión es densa y claramente cumple las propiedades requeridas.

Si tenemos definidas las iteraciones para todo $\epsilon < \lambda \leq \beta$, entonces tenemos definida una iteración $(\{\mathbb{P}'_\delta\}_{\delta \leq \lambda}, \{\pi'_\delta\}_{\delta < \lambda})$ sin más que construir \mathbb{P}'_λ tomando el

¹En realidad, hay que sustituir $p(\alpha + \epsilon)$ por otro nombre equivalente en $\hat{\pi}'_\epsilon$, pero no detallamos este tecnicismo (ni aquí ni en otros puntos de la prueba) por no complicar más la construcción.

límite con soportes finitos de los c.p.o.s precedentes. Además, las propiedades de compatibilidad de las inmersiones densas construidas hacen que esté bien definida $j_{\alpha\lambda} : \mathbb{P}_{\alpha+\lambda}/G_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}'_\lambda$ mediante $j_{\alpha\lambda}(p)(\delta) = j_{\alpha,\delta+1}(p|_{\alpha+\delta+1})(\delta)$.

Es fácil ver que es una inmersión. Por ejemplo, si $p \perp q$, existe un $\alpha + \epsilon < \lambda$ tal que $\text{sop } p \cup \text{sop } q \subset \alpha + \epsilon$, con lo que $p = i_{\alpha+\epsilon,\alpha+\lambda}(p_0)$, $q = i_{\alpha+\epsilon,\alpha+\lambda}(q_0)$, luego $p_0 \perp q_0$, luego $j_{\alpha\epsilon}(p_0) \perp j_{\alpha\epsilon}(q_0)$, luego $i_{\epsilon\lambda}(j_{\alpha\epsilon}(p_0)) \perp i_{\epsilon\lambda}(j_{\alpha\epsilon}(q_0))$, pero esto es lo mismo que $j_{\alpha\lambda}(p) \perp j_{\alpha\lambda}(q)$.

También es fácil ver que $j_{\alpha\lambda}$ es una inmersión densa. En efecto, si $p' \in \mathbb{P}'_\lambda$, existe un $\epsilon < \lambda$ tal que $p' = i_{\epsilon\lambda}(p'_0)$, luego existe un $p_0 \in \mathbb{P}_{\alpha+\epsilon}/G_\alpha$ tal que $j_{\alpha\epsilon}(p_0) \leq p'_0$, luego $j_{\alpha\epsilon}(i_{\alpha+\epsilon,\alpha+\lambda}(p_0)) = i_{\epsilon\lambda}(j_{\alpha\epsilon}(p_0)) \leq i_{\epsilon\lambda}(p'_0) = p'$. ■

8.3 La consistencia del axioma de Martin

Según comentábamos al principio del capítulo —concretando ahora un poco más— Solovay y Tennenbaum demostraron la consistencia de la hipótesis de Suslin construyendo una iteración de preórdenes $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$ en un modelo M , de modo que cualquier árbol bien podado con la condición de cadena numerable A en el modelo final $M[G]$, puesto “copa abajo”, coincidiera con uno de los c.p.o.s $\mathbb{Q}_\delta = \pi_{\delta G_\delta} \in M[G_\delta]$. De este modo $M[G_{\delta+1}] = M[G_\delta][H_\delta]$ para un cierto filtro \mathbb{Q}_δ -genérico H_δ y, por consiguiente, $H_\delta \in M[G]$ resulta ser un camino en A , lo que garantiza que A no es un árbol de Suslin en $M[G]$. Sin embargo, D.A. Martin se dio cuenta de que en realidad no era necesario tratar únicamente con posibles árboles de Suslin, sino que bastaba exigir la condición de cadena numerable. Esta observación conduce a la formulación del axioma de Martin:

Definición 8.32 Para cada cardinal κ , llamaremos *axioma de Martin* para κ a la fórmula:

AM(κ) *Si \mathbb{P} es un c.p.o. que cumple la condición de cadena numerable y \mathcal{D} es una familia de conjuntos densos en \mathbb{P} tal que $|\mathcal{D}| \leq \kappa$, entonces existe un filtro G en \mathbb{P} que corta a todos los elementos de \mathcal{D} .*

El *axioma de Martin* (AM) es la sentencia $\bigwedge \kappa < 2^{\aleph_0} \text{ AM}(\kappa)$, es decir:

Si \mathbb{P} es un c.p.o. que cumple la condición de cadena numerable y \mathcal{D} es una familia de conjuntos densos en \mathbb{P} tal que $|\mathcal{D}| < 2^{\aleph_0}$, entonces existe un filtro G en \mathbb{P} que corta a todos los elementos de \mathcal{D} .

Ejercicio: Probar que AM es equivalente a la sentencia análoga en la que no se exige que los c.p.o.s tengan máximo. (En la definición de filtro para un c.p.o. sin máximo hemos de cambiar $\mathbb{1} \in G$ por $G \neq \emptyset$.)

Así, el axioma de Martin postula la existencia de filtros “suficientemente genéricos”, en el sentido de que corten a familias relativamente grandes de conjuntos densos. Aquellas pruebas de consistencia basadas en extensiones genéricas donde en realidad sólo se necesite la existencia de un filtro que corte

a suficientes conjuntos densos (en un c.p.o. con la condición de cadena numerable) pueden obtenerse a partir del axioma de Martin, evitando así la teoría de extensiones. Éste es el caso de la hipótesis de Suslin:

Teorema 8.33 $\text{AM}(\aleph_1) \rightarrow \text{HS}$.

DEMOSTRACIÓN: Supongamos $\text{AM}(\aleph_1)$ y que existe un árbol de Suslin. Entonces existe uno bien podado A . Sea $\mathbb{P} = A$ con el orden inverso. Entonces \mathbb{P} es un c.p.o. con la condición de cadena numerable y para cada $\alpha < \omega_1$ el conjunto $D_\alpha = \{a \in A \mid \text{alt}_A a \geq \alpha\}$ es denso en \mathbb{P} . Por $\text{AM}(\aleph_1)$ tenemos un filtro G que corta a todos los conjuntos A_α , lo que se traduce en que G es un camino (no numerable) en A , contradicción. ■

Así pues, para probar la consistencia de la hipótesis de Suslin basta probar la consistencia de $\text{AM} + 2^{\aleph_0} > \aleph_1$.

La presencia de 2^{\aleph_0} en el enunciado del axioma de Martin no es arbitraria, como prueba el teorema siguiente:

Teorema 8.34 Se cumple $\text{AM}(\aleph_0) \wedge \neg\text{AM}(2^{\aleph_0})$. Así pues, $2^{\aleph_0} = \aleph_1 \rightarrow \text{AM}$.

DEMOSTRACIÓN: $\text{AM}(\aleph_0)$ es el teorema 4.21, mientras que un ejemplo que muestra $\neg\text{AM}(2^{\aleph_0})$ lo tenemos tomando $\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega, 2, \aleph_0)$, que cumple la condición de cadena numerable. Para cada $n \in \omega$, sea D_n el conjunto de las condiciones que tienen a n en su dominio y, para cada $g \in {}^\omega 2$, sea D_g el conjunto de las condiciones que difieren de f en algún número natural de su dominio.

Si suponemos $\text{AM}(2^{\aleph_0})$ tenemos que existe un filtro G que corta a todos estos conjuntos densos, lo que se traduce en que $f_G = \bigcup_{p \in G} p : \omega \longrightarrow 2$ es una función distinta de toda $g \in {}^\omega 2$, contradicción. ■

Por lo tanto, $\text{AM}(\kappa)$ no puede ser consistente más que para cardinales menores que 2^{\aleph_0} .

Ejercicio: Probar que $\text{MA}(\aleph_1)$ sería falso sin la hipótesis sobre la condición de cadena numerable. (Ayuda: considerar $\text{Fn}(\omega, \omega_1, \aleph_0)$.)

Vamos a probar que AM es consistente con cualquier determinación de 2^{\aleph_0} que sea un cardinal regular. Aquí vamos a probar que esta restricción es necesaria, es decir, que AM implica la regularidad de 2^{\aleph_0} . En general, AM implica que 2^{\aleph_0} verifica muchas propiedades en principio sólo pueden probarse para \aleph_1 . La regularidad es una de ellas. Necesitamos un hecho técnico:

Teorema 8.35 Sea $\kappa < 2^{\aleph_0}$ un cardinal infinito y supongamos $\text{AM}(\kappa)$. Consideremos una familia² $\{A_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ de subconjuntos de $\mathcal{P}\omega$ tal que $\bigwedge \alpha < \kappa |A_\alpha| = \aleph_0$ y $\bigwedge \alpha < \beta < \kappa \rightarrow |A_\alpha \cap A_\beta| < \aleph_0$. Entonces, para todo $X \subset \kappa$ existe un $A \subset \omega$ tal que

$$\bigwedge \alpha < \kappa (\alpha \in X \leftrightarrow A_\alpha \cap A \text{ es infinito}).$$

²En [TC 9.25] se prueba que existe una familia en estas condiciones.

DEMOSTRACIÓN: Sea \mathbb{P} el conjunto de las funciones $p \subset \omega \times 2$ tales que

- a) $\bigwedge \alpha \in X \mathcal{D}p \cap A_\alpha$ es finito,
- b) El conjunto $\{n \in \omega \mid p(n) = 1\}$ es finito.

Consideramos a \mathbb{P} como c.p.o. con la relación inversa de la inclusión. Hemos de pensar en las condiciones de \mathbb{P} como aproximaciones a la función característica del conjunto A que estamos buscando. Una condición p sólo puede forzar que una cantidad finita de números naturales estén en A , pero puede forzar que infinitos naturales no estén, a condición de que estén casi todos fuera de cualquier A_α con $\alpha \in X$.

Claramente \mathbb{P} cumple la condición de cadena numerable, pues si dos condiciones p y q son incompatibles, entonces

$$\{n \in \mathcal{D}p \mid p(n) = 1\} \neq \{n \in \mathcal{D}q \mid q(n) = 1\},$$

y sólo hay una cantidad numerable de subconjuntos finitos de ω .

Si $\beta \in \kappa \setminus X$, sea $D_\beta = \{p \in \mathbb{P} \mid A_\beta \subset \mathcal{D}p\}$. Si una condición $p \in D_\beta$, como sólo puede tomar un número finito de veces el valor 1, ha de tomar el valor 0 sobre casi todos los elementos de A_β . Por lo tanto D_β es el conjunto de condiciones que fuerzan que $A_\beta \cap A$ es finito (notemos que A todavía no está definido).

Se cumple que D_β es denso en \mathbb{P} , pues dada $q \in \mathbb{P}$, podemos extenderla a una condición que tome el valor 0 sobre todos los elementos de A_β sobre los que q no esté ya definida. Ciertamente p es una condición pues, cumple obviamente la propiedad a) y para todo $\alpha \in X$ se cumple que $A_\alpha \cap A_\beta$ es finito, luego $\mathcal{D}p \cap A_\alpha$ sólo contiene los números que ya estuvieran en $\mathcal{D}q \cap A_\alpha$ (una cantidad finita) más los elementos de $A_\alpha \cap A_\beta$, de donde se sigue la propiedad b). Obviamente entonces $p \in D_\beta$ y $p \leq q$.

Si $\alpha \in X$ y $m \in \omega$, sea

$$E_{\alpha m} = \{p \in \mathbb{P} \mid |\{n \in A_\alpha \cap \mathcal{D}p \mid p(n) = 1\}| \geq m\}.$$

Es claro que $E_{\alpha m}$ es el conjunto de condiciones que fuerzan que $A_\alpha \cap A$ tenga al menos m elementos. No hay dificultad en probar que $E_{\alpha m}$ es denso en \mathbb{P} .

Por AM(κ) existe un filtro G que corta a todos los conjuntos densos que hemos definido. Sea $A = \{n \in \omega \mid \bigvee p \in G (n, 1) \in p\}$. Si $\alpha \in X$ entonces $A \cap A_\alpha$ es infinito porque G corta a todos los conjuntos $E_{\alpha m}$, con $m \in \omega$. Si $\beta \in \kappa \setminus X$ entonces $A \cap A_\beta$ es finito porque G corta a D_β . ■

Teorema 8.36 Si $\kappa < 2^{\aleph_0}$ es un cardinal infinito, AM(κ) implica que $2^\kappa = 2^{\aleph_0}$. En particular, AM implica que 2^{\aleph_0} es un cardinal regular.

DEMOSTRACIÓN: La aplicación $f : \mathcal{P}\kappa \longrightarrow \mathcal{P}\omega$ que a cada $X \subset \kappa$ le asigna el conjunto A construido en el teorema anterior es claramente inyectiva, luego $2^\kappa = 2^{\aleph_0}$.

Por el teorema de König, $\kappa < \text{cf } 2^\kappa = \text{cf } 2^{\aleph_0}$, luego AM implica que 2^{\aleph_0} es regular. ■

Hay un último problema que hemos de resolver antes de probar la consistencia de AM. Se trata de que hay una clase propia de c.p.o.s con la condición de cadena numerable no semejantes entre sí. No podemos realizar una iteración de extensiones que pase por todos ellos, pues necesitaríamos que el último c.p.o. fuera una clase propia. Afortunadamente AM equivale a su restricción a un cierto conjunto de c.p.o.s. La idea central de la prueba es el argumento del teorema de Löwenheim-Skolem.

Teorema 8.37 *Sea κ un cardinal infinito. Las afirmaciones siguientes son equivalentes:*

- a) $\text{AM}(\kappa)$,
- b) $\text{AM}(\kappa)$ para c.p.o.s \mathbb{P} con la hipótesis adicional de que $|\mathbb{P}| \leq \kappa$,
- c) $\text{AM}(\kappa)$ para c.p.o.s \mathbb{P} de la forma $(\kappa, \leq, \emptyset)$ (donde \leq es un preorden arbitrario en κ).

DEMOSTRACIÓN: Obviamente a) \rightarrow b) \rightarrow c). Es obvio que b) equivale a $\text{AM}(\kappa)$ para c.p.o.s de la forma $(\mathbb{P}, \leq, \emptyset)$ con $\mathbb{P} \subset \kappa$ (pues todo c.p.o. \mathbb{P} tal que $|\mathbb{P}| \leq \kappa$ es semejante a un c.p.o. en estas condiciones). Así, para demostrar que c) \rightarrow b) podemos partir de un c.p.o. $\mathbb{P} \subset \kappa$ con máximo \emptyset (y, por supuesto, con la condición de cadena numerable).

Extendamos el preorden de \mathbb{P} a κ estableciendo que todos los elementos de $\kappa \setminus \mathbb{P}$ son máximos. Así κ se convierte en un c.p.o. con la condición de cadena numerable en el cual \mathbb{P} es denso. Es claro que si \mathcal{D} es una familia de a lo sumo κ subconjuntos densos de \mathbb{P} , éstos siguen siendo densos en κ , luego por c) existe un filtro G en κ que corta a todos los elementos de \mathcal{D} . Es inmediato comprobar que $G \cap \mathbb{P}$ es un filtro en \mathbb{P} que cumple lo mismo.

Veamos por último que b) \rightarrow a). Sea \mathbb{P} un c.p.o. arbitrario con la condición de cadena numerable y sea \mathcal{D} una familia de a lo sumo κ subconjuntos densos de \mathbb{P} .

Veamos que existe $\mathbb{Q} \subset \mathbb{P}$ tal que

1. $|\mathbb{Q}| \leq \kappa$,
2. Para todo $D \in \mathcal{D}$, se cumple que $D \cap \mathbb{Q}$ es denso en \mathbb{Q} ,
3. Dos condiciones de \mathbb{Q} son compatibles en \mathbb{Q} si y sólo si lo son en \mathbb{P} .

Si $D \in \mathcal{D}$, sea $f_D : \mathbb{P} \longrightarrow D$ tal que

$$\bigwedge p \in \mathbb{P} (f_D(p) \in D \wedge f_D(p) \leq p).$$

Sea $g : \mathbb{P} \times \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{P}$ tal que

$$\bigwedge pq \in \mathbb{P} (\neg p \perp q \rightarrow g(p, q) \leq p \wedge g(p, q) \leq q).$$

Definimos $\mathbb{Q}_0 = \{\mathbf{1}\} \wedge \bigwedge n \in \omega \mathbb{Q}_{n+1} = \mathbb{Q}_n \cup g[\mathbb{Q}_n \times \mathbb{Q}_n] \cup \bigcup_{D \in \mathcal{D}} f_D[\mathbb{Q}_n]$.

Es claro que $\mathbb{Q} = \bigcup_{n \in \omega} \mathbb{Q}_n$ cumple lo pedido.

Por 3) tenemos que \mathbb{Q} cumple la condición de cadena numerable, por 1), 2) y la hipótesis b) tenemos que existe un filtro H sobre \mathbb{Q} que corta a todos conjuntos $D \cap \mathbb{Q}$, con $D \in \mathcal{D}$. Definimos

$$G = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall q \in H \ q \leq p\}.$$

Es fácil comprobar que G es un filtro en \mathbb{P} y obviamente contiene a H , luego corta a todos los elementos de D . ■

Finalmente estamos en condiciones de demostrar la consistencia del axioma de Martin. La idea básica de la prueba es una de las paradojas del infinito: imaginemos que metemos en un saco bolas numeradas del 0 al 9, luego sacamos la bola 0, luego metemos bolas numeradas del 10 al 19 y sacamos la bola 2, etc. De este modo, aunque cada vez tenemos más bolas en el saco, al cabo de infinitos pasos no nos quedarán bolas, porque la número 0 la hemos sacado en el primer paso, la número 1 en el segundo, etc.

En nuestro caso, partimos de un modelo M con infinitos c.p.o.s que pueden incumplir el axioma de Martin, extendiendo con uno de ellos conseguimos un filtro que corta a todos los sus conjuntos densos en M , pero en la extensión puede haber nuevos conjuntos densos que necesiten otro filtro y pueden aparecer infinitos c.p.o.s nuevos que no cumplen el axioma de Martin. Así, en cada paso resolvemos parcialmente un caso y nos aparecen infinitos contraejemplos más, pero, si lo organizamos bien, al cabo de κ pasos podemos haber eliminado todos los contraejemplos.

Teorema 8.38 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y en M sea κ un cardinal regular no numerable tal que $2^{<\kappa} = \kappa$. Existe una extensión genérica N de M que cumple AM, tiene los mismos cardinales y cofinalidades, $(2^{\aleph_0} = \kappa)^N$ y la función del continuo sobre κ es la misma en M y en N .*

DEMOSTRACIÓN: Sea $g \in M$ tal que $g : \kappa \rightarrow \kappa \times \kappa \times \kappa$ biyectiva. Sea $f : \kappa \rightarrow \kappa \times \kappa$ definida como sigue: si $g(\alpha) = (\beta, \gamma, \delta)$, entonces

$$f(\alpha) = \begin{cases} (\beta, \gamma) & \text{si } \beta \leq \alpha, \\ (0, 0) & \text{si } \alpha < \beta. \end{cases}$$

De este modo, $f \in M$, $f : \kappa \rightarrow \kappa \times \kappa$ suprayectiva y

$$\wedge \alpha \beta \gamma (f(\alpha) = (\beta, \gamma) \rightarrow \beta \leq \alpha).$$

En efecto, si $(\beta, \gamma) \in \kappa \times \kappa$, entonces el conjunto

$$\{\alpha < \kappa \mid \forall \delta < \kappa \ g(\alpha) = (\beta, \gamma, \delta)\}$$

tiene cardinal $^M \kappa$, luego no está acotado en κ , luego existe un $\alpha \geq \beta$ tal que $g(\alpha) = (\beta, \gamma, \delta)$, y entonces $f(\alpha) = (\beta, \gamma)$.

Vamos a usar la función f para determinar en qué orden usamos cada c.p.o. que pueda incumplir AM para formar una extensión que le añada un filtro

genérico. Más concretamente, $f(\alpha) = (\beta, \gamma)$ significará que para formar la extensión α -ésima usaremos el γ -ésimo c.p.o. de entre los disponibles en la iteración β -ésima. Naturalmente, para que esto tuviera sentido hemos tenido que garantizar que $\beta \leq \alpha$.

Definiremos una iteración de preórdenes^M con soportes finitos de la forma

$$(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \kappa}, \{(\check{\nu}_\delta, \leq_\delta, \check{\oslash})\}_{\delta < \kappa}),$$

donde $\bigwedge \delta < \kappa \nu_\delta < \kappa$. Además se cumplirá que

$$\bigwedge \delta < \kappa \mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash (\check{\nu}_\delta, \leq_\delta, \check{\oslash}) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.}$$

Por 8.26, tendremos que cada \mathbb{P}_δ cumplirá la condición de cadena numerable en M . Veamos que estas condiciones implican que cada \mathbb{P}_δ tendrá un subconjunto denso $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ tal que $\bigwedge \delta < \kappa |\bar{\mathbb{P}}_\delta|^M < \kappa$ y $|\bar{\mathbb{P}}_\kappa|^M \leq \kappa$.

Lo probamos por inducción sobre δ . Para $\mathbb{P}_0 = \{\emptyset\}$ es trivial. Supongamos que $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ es denso en \mathbb{P}_δ y $|\bar{\mathbb{P}}_\delta|^M < \kappa$. Definimos

$$\bar{\mathbb{P}}_{\delta+1} = \{p \cup \{(\delta, \check{\alpha})\} \mid p \in \bar{\mathbb{P}}_\delta \wedge \alpha < \nu_\delta\}.$$

Podemos suponer que los nombres $\check{\alpha}$ están en $\hat{\pi}_\delta$, o también podemos sustituirlos por nombres equivalentes que sí lo estén. Claramente $\bar{\mathbb{P}}_{\delta+1} \subset \mathbb{P}_{\delta+1}$ y $|\bar{\mathbb{P}}_{\delta+1}|^M < \kappa$. Veamos que es denso.

Dado $p \in \mathbb{P}_{\delta+1}$, sea G un filtro \mathbb{P}_δ -genérico sobre M tal que $p|_\delta \in G$. Como $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash p(\delta) \in \check{\nu}_\delta$, se cumple que $p(\delta)_G = \alpha$, para un cierto $\alpha < \nu_\delta$, luego existe un $q \in \bar{\mathbb{P}}_\delta$, $q \leq p|_\delta$ tal que $q \Vdash p(\delta) = \check{\alpha}$. Entonces $q \cup \{(\delta, \check{\alpha})\} \in \bar{\mathbb{P}}_{\delta+1}$ es una extensión de p .

Dados $\{\bar{\mathbb{P}}_\delta\}_{\delta < \lambda}$, para $\lambda \leq \kappa$ definimos $\bar{\mathbb{P}}_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} i_{\delta\lambda}[\bar{\mathbb{P}}_\delta]$. Como κ es regular^M es claro que $|\bar{\mathbb{P}}_\lambda|^M < \kappa$ si $\lambda < \kappa$ y $|\bar{\mathbb{P}}_\kappa|^M \leq \kappa$. Del hecho de que los límites son directos se sigue inmediatamente que $\bar{\mathbb{P}}_\lambda$ es denso en \mathbb{P}_λ .

La razón por la que acotamos el cardinal de conjuntos densos es porque el preorden no es antisimétrico, por lo que hay muchas condiciones que contienen la misma información, lo que hace que el cardinal de los c.p.o.s completos no sea significativo.

Si $\delta, \epsilon < \kappa$, según 5.20, el número de buenos $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ -nombres para subconjuntos de $\epsilon \times \epsilon$ en M es a lo sumo $(\kappa^{\aleph_0})^{|\epsilon \times \epsilon|} \leq \kappa^{<\kappa} = (2^{<\kappa})^{<\kappa} = 2^{<\kappa} = \kappa$ (aquí usamos que $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ cumple la condición de cadena numerable por ser denso en \mathbb{P}_δ).

Vamos a construir la iteración por recurrencia en M . Tomamos $\mathbb{P}_0 = \{\emptyset\}$. Supongamos construidos $(\{\mathbb{P}_\beta\}_{\beta \leq \alpha}, \{(\check{\nu}_\beta, \leq_\beta, \check{\oslash})\}_{\beta < \alpha})$, para $\alpha < \kappa$, de modo que cumplan las propiedades indicadas y, por consiguiente, las consecuencias que acabamos de probar. En particular tenemos definidos los conjuntos $\{\bar{\mathbb{P}}_\beta\}_{\beta \leq \alpha}$.

Sea $\{(\nu_\gamma^\alpha, \leq_\gamma^\alpha)\}_{\gamma < \kappa} \in M$ una enumeración de todos los pares (ν, \leq) tales que $\nu < \kappa$ es un cardinal^M y \leq es un buen $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre^M para un subconjunto de $\nu \times \nu$. Informalmente, entre ellos están todos los c.p.o.s que nos han aparecido

en el último paso construido hasta ahora, a los cuales tendremos que añadir filtros genéricos tarde o temprano. Nuestro razonamiento recurrente nos permite suponer definidos los pares correspondientes a pasos anteriores, es decir, tenemos definidos $(\nu_\gamma^\beta, \leq_\gamma^\beta)$ para $\beta \leq \alpha$ y $\gamma < \kappa$.

Sea $f(\alpha) = (\beta, \gamma)$. Por construcción de f tenemos que $\beta \leq \alpha$, luego el par $(\nu_\gamma^\beta, \leq_\gamma^\beta)$ está definido y \leq_γ^β es un buen $\bar{\mathbb{P}}_\beta$ -nombre para un subconjunto de $\nu_\gamma^\beta \times \nu_\gamma^\beta$. Definimos $\nu_\alpha = \nu_\gamma^\beta$ y sea $\sigma = i_{\beta\alpha}(\leq_\gamma^\beta) \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$.

Claramente

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \forall R((\check{\nu}_\alpha, R, \emptyset) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.} \wedge \\ ((\check{\nu}_\alpha, \sigma, \emptyset) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.} \rightarrow R = \sigma)). \end{aligned}$$

Por 4.61 existe un $\leq_\alpha \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ tal que

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash ((\check{\nu}_\alpha, \leq_\alpha, \emptyset) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.} \wedge \\ ((\check{\nu}_\alpha, i_{\beta\alpha}(\leq_\gamma^\beta), \emptyset) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.} \rightarrow \leq_\alpha = i_{\beta\alpha}(\leq_\gamma^\beta))). \end{aligned}$$

Definimos $\mathbb{P}_{\alpha+1}$ tal y como exige la definición de iteración de preórdenes. Esta definición también determina el caso límite (teniendo en cuenta que exigimos siempre límites directos).

Con esto tenemos definido el c.p.o. $\mathbb{P} = \mathbb{P}_\kappa \in M$. Además hemos probado que \mathbb{P}_κ cumple la condición de cadena numerable^M y contiene un subconjunto denso $\bar{\mathbb{P}}_\kappa$ tal que $|\bar{\mathbb{P}}_\kappa|^M \leq \kappa$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Por la condición de cadena numerable, los cardinales y las cofinalidades en M son los mismos que en $M[G]$. Vamos a calcular la función del continuo en $M[G]$. Puesto que $M[G]$ puede obtenerse también como extensión genérica sobre $\bar{\mathbb{P}} = \bar{\mathbb{P}}_\kappa$, podemos trabajar con éste último.

Si $\mu \geq \kappa$ es un cardinal^M, por 5.20, el número de buenos $\bar{\mathbb{P}}$ -nombres^M para subconjuntos de $\check{\mu}$ es a lo sumo $\kappa^\mu = 2^\mu$, de donde se sigue que $(2^\mu)^M = (2^\mu)^{M[G]}$ para cardinales mayores o iguales que κ .

El número de buenos $\bar{\mathbb{P}}$ -nombres^M para subconjuntos de $\check{\omega}$ es a lo sumo $\kappa^{\aleph_0} = \kappa$, luego, en $M[G]$, $2^{\aleph_0} \leq \kappa$.

El resto de la función del continuo en $M[G]$ quedará completamente determinado en cuanto probemos que $M[G]$ cumple AM(ν) para todo cardinal infinito $\nu < \kappa$, pues entonces $\nu < (2^{\aleph_0})^{M[G]}$, de donde $(2^{\aleph_0})^{M[G]} = \kappa$. A su vez esto implica que $M[G]$ cumple AM. Finalmente, el teorema 8.36 nos da que $(2^\nu)^{M[G]} = \kappa$ para todo cardinal infinito $\nu \leq \kappa$.

Según el teorema anterior, para probar AM(ν)^{M[G]}, donde $\nu < \kappa$ es un cardinal^{M[G]}, basta considerar un c.p.o. de la forma $(\nu, R, \emptyset) \in M[G]$ con la condición de cadena numerable^{M[G]} y una familia $\mathcal{D} \in M[G]$ de conjuntos densos en (ν, R, \emptyset) tal que $|\mathcal{D}|^{M[G]} \leq \nu$.

Por 8.24, como $R \subset \nu \times \nu \in M$ y $(|\nu \times \nu| < \kappa = \text{cf } \kappa)^{M[G]}$, existe un $\beta < \kappa$ tal que $R \in M[G_\beta]$.

Fijemos una enumeración $\{D_\alpha\}_{\alpha < \nu} \in M[G]$ de la familia \mathcal{D} . Consideremos el conjunto $A = \{(\alpha, \delta) \in \nu \times \nu \mid \delta \in D_\alpha\} \subset \nu \times \nu$. De nuevo por 8.24 podemos afirmar que existe un $\beta < \kappa$ tal que $A \in M[G_\beta]$, con lo que $\mathcal{D} \in M[G_\beta]$. Tomándolo suficientemente grande podemos suponer que $R, \mathcal{D} \in M[G_\beta]$.

De este modo, $R = (\leq_\gamma^\beta)_{G_\beta}$ para cierto $\gamma < \kappa$ y $\nu = \nu_\gamma^\beta$. Sea $\alpha \geq \beta$ tal que $f(\alpha) = (\beta, \gamma)$. Sea $\sigma = i_{\beta\alpha}(\leq_\gamma^\beta)$. Como $i_{\beta\alpha}$ es una inmersión completa, sabemos por 4.42 que $R = (\leq_\gamma^\beta)_{G_\beta} = (\leq_\gamma^\beta)_{i_{\beta\alpha}^{-1}[G_\alpha]} = i_{\beta\alpha}(\leq_\gamma^\beta)_{G_\alpha} = \sigma_{G_\alpha}$.

Así pues, $(\nu, R, \emptyset) \in M[G_\alpha]$ y es un c.p.o. con la condición de cadena numerable $^{M[G_\alpha]}$, pues si tuviera una anticadena no numerable $^{M[G_\alpha]}$ ésta sería también no numerable $^{M[G]}$, porque los cardinales son los mismos. Por construcción tenemos que $\nu_\alpha = \nu_\gamma^\beta = \nu$ y

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash ((\check{\nu}_\alpha, \leq_\alpha, \check{\emptyset}) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.} \wedge$$

$$((\check{\nu}_\alpha, i_{\beta\alpha}(\leq_\gamma^\beta), \check{\emptyset}) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.} \rightarrow \leq_\alpha = i_{\beta\alpha}(\leq_\gamma^\beta))),$$

luego

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash ((\check{\nu}, \sigma, \check{\emptyset}) \text{ es un c.p.o. con la c.c.n.} \rightarrow \leq_\alpha = \sigma).$$

Por consiguiente $\leq_{\alpha G_\alpha} = \sigma_{G_\alpha} = R$. Según el teorema 8.23, tenemos que $M[G_{\alpha+1}] = M[G_\alpha][H]$, donde H es un filtro (ν, R, \emptyset) -genérico sobre $M[G_\alpha]$, con lo que en particular corta a todos los conjuntos densos de la familia \mathcal{D} . Esto demuestra $\text{AM}(\nu)^{M[G]}$. ■

Con esto queda probado que el axioma de Martin es consistente con cualquier determinación consistente de la función del continuo que satisfaga el teorema 8.36. En particular es consistente $\text{AM} + 2^{\aleph_0} > \aleph_1$ y con ello la hipótesis de Suslin.

8.4 Consecuencias topológicas de AM

La c.c.n. en productos Consideremos el problema de si el producto de dos espacios topológicos con la c.c.n. tiene la c.c.n. Recordemos que [TC 8.50] reduce el problema al caso de productos de dos factores, mientras que [TC 10.54] lo reduce al caso del producto de dos c.p.o.s. Por otro lado, [TC 10.58] prueba que si $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ entonces el producto de dos espacios con la c.c.n. no tiene por qué cumplir la c.c.n. Lo que vamos a probar aquí es que $\text{AM} + 2^{\aleph_0} > \aleph_1$ implica lo contrario. Para ello introducimos el concepto siguiente:

Definición 8.39 Diremos que un c.p.o. \mathbb{P} cumple la *condición de cadena numerable fuerte* si todo conjunto $W \subset \mathbb{P}$ no numerable contiene un subconjunto Z no numerable con todos sus elementos compatibles dos a dos.

Obviamente, la condición de cadena numerable fuerte implica la condición de cadena numerable. Por otra parte:

Teorema 8.40 Si \mathbb{P} y \mathbb{Q} son c.p.o.s de modo que \mathbb{P} cumple la condición de cadena numerable fuerte y \mathbb{Q} cumple la condición de cadena numerable, entonces $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ cumple la condición de cadena numerable.

DEMOSTRACIÓN: Sea $W \subset \mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ un conjunto no numerable. Consideremos el conjunto $W_0 = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall q \in \mathbb{Q} (p, q) \in W\}$. Si W_0 es numerable existe un $p \in \mathbb{P}$ tal que $W_p = \{q \in \mathbb{Q} \mid (p, q) \in W\}$ es no numerable. Como \mathbb{Q} cumple la condición de cadena numerable existen dos condiciones compatibles en W_p , digamos q_1 y q_2 . Así (p, q_1) y (p, q_2) son condiciones compatibles en W .

Si, por el contrario, W_0 es no numerable, existe $Z \subset W_0$ cuyos elementos son compatibles dos a dos. Para cada $p \in Z$, sea $q_p \in \mathbb{Q}$ tal que $(p, q_p) \in W$. Si $q_{p_1} = q_{p_2}$ para ciertos $p_1, p_2 \in Z$ distintos, entonces (p_1, q_{p_1}) y (p_2, q_{p_2}) son condiciones compatibles en W , mientras que si la aplicación $p \mapsto q_p$ es inyectiva entonces el conjunto $\{q_p \mid p \in Z\}$ es no numerable, luego existen $p_1, p_2 \in Z$ distintos tales que q_{p_1} y q_{p_2} son compatibles. De nuevo (p_1, q_{p_1}) y (p_2, q_{p_2}) son condiciones compatibles en W .

En cualquier caso tenemos que W no puede ser una anticadena, luego $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ cumple la condición de cadena numerable. ■

Ahora ya podemos probar:

Teorema 8.41 Suponiendo $AM(\aleph_1)$ se cumple:

- a) Todo c.p.o. con la condición de cadena numerable cumple la condición de cadena numerable fuerte.
- b) El producto de c.p.o.s con la condición de cadena numerable cumple la condición de cadena numerable.
- c) El producto de espacios topológicos con la condición de cadena numerable cumple la condición de cadena numerable.

DEMOSTRACIÓN: b) es consecuencia de a) y del teorema anterior, mientras que c) se sigue de b) y de los teoremas [TC 8.50] y [TC 10.54]. Sea \mathbb{P} un c.p.o. con la condición de cadena numerable y $W = \{q_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ un subconjunto de \mathbb{P} .

Veamos que existe $p_0 \in W$ tal que todo $p \leq p_0$ es compatible con una cantidad no numerable de elementos de W . En caso contrario, para cada $\alpha < \omega_1$ existe $\alpha < \beta < \omega_1$ y $r_\alpha \leq q_\alpha$ de modo que $r_\alpha \perp q_\gamma$ si $\beta < \gamma < \omega_1$, y esto nos permite construir por recurrencia una anticadena $\{r_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$, contradicción.

Fijado, pues, p_0 , para cada $\alpha < \omega_1$ definimos

$$D_\alpha = \{p \in \mathbb{P} \mid p \leq p_0 \wedge \forall \gamma < \omega_1 (\alpha \leq \gamma \wedge p \leq q_\gamma)\}.$$

Se cumple que D_α es denso bajo p_0 , pues si $t \leq p_0$ entonces t es compatible con algún q_γ , para $\gamma \geq \alpha$, luego existe un $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \leq t$ y $p \leq q_\gamma$, es decir, $p \in D_\alpha$ y $p \leq t$.

El conjunto $\mathbb{P}_0 = \{p \in \mathbb{P} \mid p \leq p_0\}$ es un c.p.o. en el que los conjuntos D_α son densos, y obviamente cumple la condición de cadena numerable. Por AM(\aleph_1) existe un filtro G_0 en \mathbb{P}_0 que corta a todos los conjuntos D_α . Sea

$$G = \{p \in G \mid \forall p' \in G_0 \ p' \leq p\}.$$

Claramente G es un filtro en \mathbb{P} que contiene a p_0 y corta a todos los conjuntos D_α . Además $Z = G \cap W$ es un subconjunto de W formado por condiciones compatibles dos a dos, luego basta probar que es no numerable. En efecto, si $\alpha < \omega_1$ existe $p \in G \cap D_\alpha$, luego existe $\alpha \leq \gamma < \omega_1$ tal que $p \leq q_\gamma$, luego $q_\gamma \in G$. Así pues, el conjunto $\{\gamma < \omega_1 \mid q_\gamma \in G\}$ no está acotado, luego no es numerable. ■

Conviene observar que la teoría de las extensiones genéricas permite enunciar una condición necesaria y suficiente muy simple para que un producto de c.p.o.s cumpla la c.c.n.:

Teorema 8.42 *Si \mathbb{P} y \mathbb{Q} son dos c.p.o.s con la c.c.n., entonces $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ cumple la c.c.n. si y sólo si $\mathbb{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \check{\mathbb{Q}}$ cumple la c.c.n.*

DEMOSTRACIÓN: Una implicación es un caso particular del teorema 8.14: si $\mathbb{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \check{\mathbb{Q}}$ cumple la c.c.n., entonces $\mathbb{P} * \check{\mathbb{Q}}$ cumple la c.c.n., pero es fácil ver que $(p, q) \mapsto (p, \check{q})$ es una inmersión densa de $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ en $\mathbb{P} * \check{\mathbb{Q}}$, luego $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ también cumple la c.c.n.

Supongamos ahora que $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$ cumple la c.c.n. Podemos trabajar en un modelo transitivo numerable M de ZFC, con lo que tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico G y tenemos que probar que \mathbb{Q} cumple la c.c.n. en $M[G]$. En caso contrario, sea $f : \omega_1 \longrightarrow \mathbb{Q}$ una aplicación inyectiva $f \in M[G]$ cuya imagen sea una anticadena en \mathbb{Q} . Sea $f = \sigma_G$ y sea $p \in \mathbb{P}$ tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}} \Vdash \sigma : \omega_1 \longrightarrow \check{\mathbb{Q}}$ inyectiva $\wedge \sigma[\omega_1]$ es una anticadena.

Para cada $\alpha < \omega_1$, existen un $p_\alpha \in \mathbb{P}$ y un $q_\alpha \in \mathbb{Q}$ tales que $p_\alpha \leq p$, $p_\alpha \Vdash \sigma(\check{\alpha}) = \check{q}_\alpha$. Entonces, la sucesión $\{(p_\alpha, q_\alpha)\}_{\alpha < \omega_1} \in M$ es una anticadena en $\mathbb{P} \times \mathbb{Q}$, pues si existiera $(p', q') \leq (p_\alpha, q_\alpha)$, $(p', q') \leq (p_\beta, q_\beta)$, entonces

$$p' \Vdash \check{q}' \leq \sigma(\check{\alpha}) \wedge \check{q}' \leq \sigma(\check{\beta}),$$

pero también fuerza que $\sigma[\omega_1]$ es una anticadena, contradicción. ■

Intersecciones de abiertos densos Pasamos a la segunda aplicación, que en realidad resulta ser una equivalencia del axioma de Martin:

Teorema 8.43 *Sea $\kappa < 2^{\aleph_0}$ un cardinal infinito y supongamos AM(κ). Entonces, si K es un espacio de Hausdorff compacto con la condición de cadena numerable y \mathcal{D} es una familia no vacía de a lo sumo κ abiertos densos en K , entonces $\bigcap \mathcal{D} \neq \emptyset$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea \mathbb{P} el conjunto de los abiertos no vacíos de K , con el orden dado por la inclusión. Claramente se trata de un c.p.o. con máximo $\mathbf{1} = K$. Además, dos abiertos son incompatibles si y sólo si son disjuntos, luego el hecho de que K cumpla la c.c.n. como espacio topológicos implica trivialmente que \mathbb{P} la cumple como c.p.o.

Para cada $D \in \mathcal{D}$, definimos $\hat{D} = \{p \in \mathbb{P} \mid \bar{p} \subset D\}$. Se trata de un conjunto denso en \mathbb{P} , pues si $p \in \mathbb{P}$, existe un $x \in p \cap D$ y, como la intersección es abierta, existe³, $q \in \mathbb{P}$ tal que $x \in q \subset \bar{q} \subset p \cap D$.

Por $AM(\kappa)$ existe un filtro G que corta a todos los conjuntos \hat{D} con $D \in \mathcal{D}$. Ahora, $\{\bar{p} \mid p \in G\}$ es una familia de cerrados en K con la propiedad de la intersección finita. Por compacidad $\bigcap_{p \in G} \bar{p} \neq \emptyset$, pero claramente $\bigcap_{p \in G} \bar{p} \subset \bigcap_{D \in \mathcal{D}} D$. ■

Nota Observemos que la prueba de $AM(\aleph_0)$ no requiere que los c.p.o.s cumplan la c.c.n., pues se trata simplemente del teorema 4.21, por lo que el teorema anterior para $\kappa = \aleph_0$ es un teorema de ZFC incluso para espacios K que no cumplen la c.c.n. De hecho, se trata de una de las formas equivalentes del *teorema de Baire*. ■

Vamos a probar que, tal y como hemos indicado, la propiedad del teorema anterior es de hecho equivalente a $AM(\kappa)$. Para ello observamos primero lo siguiente:

Teorema 8.44 *Si κ es un cardinal infinito, $AM(\kappa)$ es equivalente a su restricción a álgebras de Boole completas.*

DEMOSTRACIÓN: Suponemos que $AM(\kappa)$ se cumple para toda álgebra de Boole completa (con la c.c.n.) y sea \mathbb{P} un c.p.o. arbitrario con la c.c.n. Por 8.37 podemos suponer que $|\mathbb{P}| \leq \kappa$. Fijemos una familia \mathcal{D} de a lo sumo κ subconjuntos densos de \mathbb{P} .

Consideramos la compleción de \mathbb{P} dada por [TC 10.22], es decir, tenemos una inmersión densa $i : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{B}$, donde \mathbb{B} es un álgebra de Boole completa. Observemos que \mathbb{B} cumple la c.c.n., pues si $C \subset \mathbb{B}$ fuera una anticadena no numerable en \mathbb{B} , para cada $s \in C$ podríamos tomar $p_s \in \mathbb{P}$ tal que $i(p_s) \leq s$, y entonces $\{p_s \mid s \in C\}$ sería una anticadena no numerable en \mathbb{P} .

También es claro que si $D \in \mathcal{D}$ entonces $i[D]$ es denso en \mathbb{B} , luego por hipótesis existe un filtro G en \mathbb{B} que corta a todos los conjuntos $i[D]$, con $D \in \mathcal{D}$. Esto implica a su vez que $H = i^{-1}[G]$ corta a todos los elementos de \mathcal{D} . Sin embargo, sucede que H no es necesariamente un filtro en G . Obviamente $\mathbf{1} \in H$

³Aquí usamos que los espacios de Hausdorff compactos son regulares, es decir, que dado un punto $x \in K$ y un cerrado $C = K \setminus (p \cap D)$ tal que $x \notin C$, existen abiertos disjuntos q, q' tales que $x \in q$, $C \subset q'$, y así $x \in q \subset \bar{q} \subset K \setminus q' \subset K \setminus C = p \cap D$. A su vez, esto se debe a que, para cada $y \in C$, podemos tomar abiertos disjuntos tales que $x \in U_y$, $y \in V_y$ y, como los V_y cubren el compacto C , podemos tomar un subcubrimiento finito V_{y_1}, \dots, V_{y_n} , y entonces basta tomar $q = \bigcap_{i=1}^n U_{y_i}$, $q' = \bigcup_{i=1}^n V_{y_i}$.

y si $p \leq q$ con $p \in H$ también $q \in H$. El problema es que no podemos probar que dos elementos de H tienen una extensión en H .

Para resolver esto, para cada $p, q \in \mathbb{P}$, definimos

$$D_{pq} = \{r \in \mathbb{P} \mid (r \leq p \wedge r \leq q) \vee r \perp p \vee r \perp q\}.$$

Se cumple que es denso en \mathbb{P} . En efecto, si $s \in \mathbb{P}$, o bien tiene una extensión incompatible con p o con q (con lo que dicha extensión está en D_{pq}) o, en caso contrario, $\neg s \perp p$, luego existe $s' \in \mathbb{P}$ tal que $s' \leq s$, $s' \leq p$, pero s' tiene que ser compatible con q , luego existe $s'' \in \mathbb{P}$ tal que $s'' \leq s'$, $s'' \leq q$, luego $s'' \in D_{pq}$ y $s'' \leq s$.

Como estamos suponiendo que $|\mathbb{P}| \leq \kappa$, no perdemos generalidad si suponemos que los conjuntos D_{pq} están en \mathcal{D} , y así sí que podemos probar que H es un filtro en \mathbb{P} . En efecto, dados $p, q \in H$, tenemos que existe $r \in H \cap D_{pq}$. Si $r \perp p$, entonces $i(r) \perp i(p)$, porque i es una inmersión, lo cual es imposible porque ambos están en G , luego r es compatible con p , y por el mismo motivo con q , luego por definición de D_{pq} tiene que ser $r \leq p \wedge r \leq q$. ■

Ahora ya podemos probar:

Teorema 8.45 *Sea κ un cardinal infinito. Entonces AM(κ) es equivalente a la conclusión del teorema 8.43.*

DEMOSTRACIÓN: Sea \mathbb{B} un álgebra de Boole completa con la c.c.n. y sea \mathcal{D} una familia de a lo sumo κ subconjuntos densos en \mathbb{B} . Por el teorema anterior basta probar que existe un filtro \mathbb{B} -genérico sobre \mathcal{D} . Para ello consideramos el espacio de Stone K de \mathbb{B} [TC 10.44], es decir, el conjunto de todos los ultrafiltros de \mathbb{B} con la topología que tiene por base los conjuntos

$$C_p = \{x \in K \mid p \in x\},$$

para cada $p \in \mathbb{B}$. Se trata de un espacio de Hausdorff cuya álgebra de abiertos-cerrados está formada por los abiertos básicos C_p y es isomorfa a \mathbb{B} (por el isomorfismo dado por $p \mapsto C_p$). Esto implica que K cumple la c.n.n., pues de toda anticadena en K se puede extraer una anticadena en \mathbb{B} del mismo cardinal.

Para cada $D \in \mathcal{D}$, podemos considerar $\hat{D} = \bigcup_{p \in D} C_p$, que claramente es abierto en K , y de hecho es denso, pues todo abierto no vacío contiene un C_q , para cierto $q \in \mathbb{B}$ no nulo, y a su vez existe $p \in D$ tal que $p \leq q$, y entonces $\emptyset \neq C_p \subset \hat{D} \cap C_q$. Por hipótesis $\bigcap_{D \in \mathcal{D}} \hat{D} \neq \emptyset$, y si tomamos G en la intersección, entonces G es un ultrafiltro en \mathbb{B} con la propiedad de que, para cada $D \in \mathcal{D}$, tenemos que $G \in \hat{D}$, luego existe un $p \in D$ tal que $G \in C_p$, luego $p \in G$. Así pues, $G \cap D \neq \emptyset$. ■

8.5 Árboles de Aronszajn especiales

En esta sección demostraremos que el axioma de Martin implica una afirmación ligeramente más fuerte que la hipótesis de Suslin:

Definición 8.46 Un árbol de Aronszajn es *especial* si se descompone en una unión numerable de anticadenas.

Observemos que, como un árbol de Aronszajn tiene cardinal \aleph_1 , si se descompone en una unión numerable de anticadenas, una de ellas debe ser no numerable, luego no puede ser un árbol de Suslin. Así pues, la sentencia “todo árbol de Aronszajn es especial” implica la hipótesis de Suslin.

Vamos a probar que el axioma de Martin implica que todo árbol de Aronszajn es especial, pero antes veremos algunas caracterizaciones de este concepto:

Teorema 8.47 *Sea A un árbol de Aronszajn. Las afirmaciones siguientes son equivalentes:*

- a) *A es especial.*
- b) *Existe $f : A \rightarrow \omega$ tal que $\bigwedge pq \in A (p < q \rightarrow f(p) \neq f(q))$.*
- c) *Existe $f : A \rightarrow \mathbb{Q}$ estrictamente creciente.*

DEMOSTRACIÓN: a) \Rightarrow b) es trivial: si $A = \bigcup_{n \in \omega} A_n$, donde cada A_n es una anticadena, podemos suponer que los conjuntos A_n son disjuntos dos a dos, y entonces basta definir $f(p) = n \leftrightarrow p \in A_n$.

b) \Rightarrow c) Dada $f : A \rightarrow \omega$ según b), definimos $g : A \rightarrow \mathbb{Q}$ mediante

$$g(p) = \sum_{n \in I_p} 2^{-n},$$

donde $I_p = \{n \leq f(p) \mid \forall q \leq p \ f(q) = n\}$. Veamos que es estrictamente creciente. Para ello tomamos $p_1 < p_2$. Observemos que dos elementos $\leq p_2$ son compatibles, luego no pueden tener la misma imagen por f , luego, o bien $f(p_1) < f(p_2)$ o bien $f(p_2) < f(p_1)$.

Si $f(p_1) < f(p_2)$, entonces $I_{p_1} \subsetneq I_{p_2}$ y es claro que $g(p_1) < g(p_2)$. Supongamos, pues, que $f(p_2) < f(p_1)$. Entonces $f(p_1) \in I_{p_1} \setminus I_{p_2}$, luego podemos tomar $n_0 = \min(I_{p_1} \setminus I_{p_2})$. Tiene que ser $n_0 > f(p_2)$, pues si $n_0 \leq f(p_2)$ (teniendo en cuenta que $n_0 \in I_{p_1}$) trivialmente $n_0 \in I_{p_2}$. Entonces

$$\begin{aligned} g(p_1) &= \sum_{n \in I_{p_1} \cap I_{p_2}} 2^{-n} + \sum_{n \in I_{p_1} \setminus I_{p_2}} 2^{-n} \leq \sum_{n \in I_{p_1} \cap I_{p_2}} 2^{-n} + 2^{-(n_0-1)} \\ &< \sum_{n \in I_{p_1} \cap I_{p_2}} 2^{-n} + 2^{-f(p_2)} \leq g(p_2). \end{aligned}$$

c) \Rightarrow a) es trivial, pues cada $f^{-1}[\{q\}]$, con $q \in \mathbb{Q}$, es una anticadena en A . ■

Nota En [TC 9.10] construimos un árbol de Aronszajn A^* , y es fácil modificarlo para obtener un árbol de Aronszajn especial. Basta tener en cuenta que los elementos de A^* son aplicaciones inyectivas $s : \alpha \rightarrow \omega$ con $\alpha < \omega_1$ y que la relación de orden es la inclusión (y que la altura de s coincide con su dominio). Para obtener un árbol de Aronszajn especial basta definir B como el conjunto de los elementos de A^* cuyo dominio es un ordinal sucesor, también con el orden dado por la inclusión.

Es claro que B sigue siendo un \aleph_1 -árbol, es decir, tiene altura \aleph_1 y sus niveles son numerables. De hecho, $\text{Niv}_\alpha B = \text{Niv}_{\alpha+1} A^*$. Pero en B podemos definir la aplicación $f : B \rightarrow \omega$ dada por $f(s) = s(\text{máx } \mathcal{D}s)$, y es claro que si $s < t$ son elementos de B , entonces $f(s) \neq f(t)$, ya que en caso contrario t tomaría dos veces el valor $f(t)$.

Esto implica que B es unión numerable de anticadenas, y esto a su vez implica que no tiene cadenas no numerables, pues una cadena sólo puede tener un elemento en común con una anticadena. Por lo tanto B es un árbol de Aronszajn especial. ■

Otra observación que nos será útil es la siguiente:

Teorema 8.48 *Sea A un árbol de Aronszajn y $C \subset \omega_1$ un c.n.a. Supongamos que existe $f : \bigcup_{\alpha \in C} \text{Niv}_\alpha A \rightarrow \mathbb{Q}$ estrictamente creciente. Entonces A es especial.*

DEMOSTRACIÓN: Llamemos $B = \bigcup_{\alpha \in C} \text{Niv}_\alpha A$. Observemos que no perdemos generalidad si suponemos que $0 \in C$. En efecto, si $f[B]$ no estuviera acotado inferiormente en \mathbb{Q} , siempre podemos componer f con una aplicación estrictamente creciente que transforme \mathbb{Q} en \mathbb{Q}^+ , por ejemplo, y así “queda espacio” para extender f a $\text{Niv}_0 A$ de forma que siga siendo estrictamente creciente.

Como C es c.n.a., es el rango de una función normal $C = \{\alpha_\delta\}_{\delta < \omega_1}$, con $\alpha_0 = 0$. Para cada $\beta \in \omega_1$ existe un único $\delta < \omega_1$ tal que $\alpha_\delta \leq \beta < \alpha_{\delta+1}$.

Por otro lado, cada conjunto $f^{-1}[r]$, con $r \in \mathbb{Q}$ es una anticadena en B , luego enumerando las no vacías podemos expresar $B = \bigcup_{n \in \omega} B_n$ como una unión numerable de anticadenas.

Cada $s \in \text{Niv}_{\alpha_\delta} A$ tiene una cantidad numerable de extensiones $\{s_{\delta,m}\}_{m < \omega}$ de altura menor que $\alpha_{\delta+1}$. Llamamos

$$B_{nm} = \{t \in A \mid \forall \delta < \omega_1 \forall s \in \text{Niv}_{\alpha_\delta} A (t = s_{\delta,m} \wedge s \in B_n)\},$$

de modo que $A = \bigcup_{m,n} B_{mn}$, pues si $t \in A$ tiene altura β y $\alpha_\delta \leq \beta < \alpha_{\delta+1}$, necesariamente $t = s_{\delta,m}$, para cierto $m \in \omega$.

Ahora basta observar que cada B_{nm} es una anticadena, pues si $t = s_{\delta,m}$, $t' = s'_{\epsilon,m}$ de modo que $s, s' \in B_n$ y $\neg t \perp t'$, entonces $\neg s \perp s'$, luego $s = s'$, luego $\delta = \epsilon$, luego $t = t'$. ■

Finalmente probamos:

Teorema 8.49 *AM(\aleph_1) implica que todo árbol de Aronszajn es especial.*

DEMOSTRACIÓN: Sea A un árbol de Aronszajn y definimos \mathbb{P} como el conjunto de todas las aplicaciones $p : a \rightarrow \omega$ tales que $a \subset A$ es finito y $\bigwedge st \in a (s < t \rightarrow p(s) \neq p(t))$. Consideramos a \mathbb{P} como c.p.o. con el orden dado por la inclusión.

El único problema técnico es demostrar que \mathbb{P} cumple la c.c.n. Aceptando esto, basta tener en cuenta que, para cada $s \in A$, el conjunto

$$D_s = \{p \in \mathbb{P} \mid s \in \mathcal{D}p\}$$

es denso en \mathbb{P} , y en total hay \aleph_1 subconjuntos de esta forma, luego $\text{AM}(\aleph_1)$ implica que existe un filtro G en \mathbb{P} que los corta a todos ellos. Es claro que $f = \bigcup G : A \rightarrow \omega$ cumple el apartado a) del teorema 8.47, lo que implica que A es especial.

Veamos, pues, que \mathbb{P} cumple la c.c.n. Para ello fijamos un conjunto no numerable $C \subset \mathbb{P}$ y vamos a probar que no puede ser una anticadena. El conjunto $\{\mathcal{D}p \mid p \in C\}$ no puede ser numerable, pues entonces habría una cantidad no numerable de condiciones con el mismo dominio finito, lo cual es absurdo. Por lo tanto podemos aplicar el lema de los sistemas Δ [TC 8.52], reduciendo C podemos suponer que $\{\mathcal{D}p \mid p \in C\}$ es una familia cuasidisjunta no numerable de raíz $r \subset A$. Más aún, como el conjunto $\{p|_r \mid p \in C\}$ tiene que ser numerable, podemos restringir C aún más y suponer que existe $p_0 : r \rightarrow \omega$ tal que $\bigwedge p \in C p|_r = p_0$ (siempre sin perder la no numerabilidad de C). No obstante, esto no garantiza que las condiciones de C sean compatibles. Para concluir la prueba sólo tenemos que demostrar lo siguiente:

Sea A un árbol de Aronszajn y S una familia no numerable de subconjuntos finitos de A disjuntos dos a dos. Entonces existen $u, v \in S$ distintos entre sí tales que cada elemento de u es incompatible con cada elemento de v .

En efecto, basta aplicar esto a $\{\mathcal{D}p \setminus r \mid p \in C\}$, con lo que obtenemos dos condiciones $p, q \in C$ tales que los elementos de $\mathcal{D}p \setminus r$ son incompatibles con los de $\mathcal{D}q \setminus r$, y entonces $p \cup q \in \mathbb{P}$ es una extensión común de p y q , por lo que C no es una anticadena.

Supongamos que el resultado es falso y sea S un contraejemplo. Restringiendo S podemos suponer que todos sus elementos tienen el mismo cardinal $n > 0$. Para cada $s \in S$ elegimos una enumeración $\{s_0, \dots, s_{n-1}\}$.

Sea D un ultrafiltro uniforme sobre S , es decir, un ultrafiltro en \mathcal{PS} cuyos elementos tengan todos el cardinal de S . Su existencia viene dada por el teorema [TC 10.62]. Para cada $x \in A$ y cada $k < n$, sea W_{xk} el conjunto de todos los $s \in S$ tales que x es compatible con s_k . Así, como cada $s \in S$ tiene un elemento compatible con un elemento de cualquier $s' \in S$, se cumple que

$$\bigcup_{x \in s} \bigcup_{k < n} W_{xk} = S \in D.$$

Como la unión es finita, para cada $s \in S$ podemos encontrar un $x_s \in s$ y un $k_s < n$ tales que $W_{x_s k_s} \in D$. Tomemos $k < n$ tal que $Z = \{s \in S \mid k_s = k\}$ es

no numerable. Basta probar que $\{x_s \mid s \in Z\}$ es una cadena en A . Notemos que es no numerable porque los elementos de S son disjuntos dos a dos, con lo que tendremos una contradicción con que A es un árbol de Aronszajn.

En efecto, si $s_1, s_2 \in Z$, entonces $W = W_{x_{s_1} k} \cap W_{x_{s_2} k} \in D$, luego W es no numerable. Si $s \in W$, entonces su k -ésimo elemento es compatible tanto con x_{s_1} como con x_{s_2} . Como W es no numerable y sólo hay una cantidad numerable de elementos bajo x_{s_1} y x_{s_2} , tiene que existir un $s \in W$ tal que $s_k > x_{s_1} \wedge s_k > x_{s_2}$, pero entonces x_{s_1} y x_{s_2} son compatibles. ■

Capítulo IX

Aplicaciones de las extensiones iteradas

Dedicamos este capítulo a presentar diversas pruebas de consistencia ilustrativas que se obtienen mediante extensiones iteradas con soportes finitos, directamente o bien a través del axioma de Martin.

9.1 Cardinales característicos

Se suele llamar *cardinales característicos del continuo* a ciertos cardinales definidos en términos de objetos relacionados con conjuntos de cardinal 2^{\aleph_0} , como el conjunto \mathbb{R} de los números reales, o $\mathcal{P}\omega$, o ${}^\omega\omega$.

El cardinal característico más elemental es el cardinal del continuo $\mathfrak{c} = 2^{\aleph_0}$. Vamos a presentar algunos más.

Definición 9.1 Definimos en ${}^\omega\omega$ la relación de orden parcial dada por

$$f \leq^* g \leftrightarrow \forall k \in \omega \wedge n \in \omega (k \leq n \rightarrow f(n) \leq g(n)),$$

es decir, $f \leq^* g$ si f es finalmente menor o igual que g . Consideramos también la relación de equivalencia

$$f =^* g \leftrightarrow \forall k \in \omega \wedge n \in \omega (k \leq n \rightarrow f(n) = g(n)),$$

de modo que $f <^* g$ se entenderá como $f \leq^* g \wedge f \neq^* g$ y no¹ como la definición análoga a \leq^* cambiando \leq por $<$.

Definimos \mathfrak{b} como el menor cardinal posible de una familia de funciones $\mathcal{B} \subset {}^\omega\omega$ que no esté acotada respecto de \leq^* , es decir, tal que no exista $g \in {}^\omega\omega$ de manera que toda $f \in \mathcal{B}$ cumpla $f \leq^* g$.

¹Observemos también que $f \neq^* g$ hay que entenderlo como la negación de $f =^* g$ y no como $\forall k \in \omega \wedge n \in \omega (k \leq n \rightarrow f(n) \neq g(n))$.

El cardinal \mathfrak{d} se define como el menor cardinal posible de una familia de funciones $\mathcal{D} \subset {}^\omega\omega$ que sea *dominante*, es decir, que para toda $f \in {}^\omega\omega$ existe $g \in \mathcal{D}$ tal que $f \leq^* g$.

Todo lo que puede probarse en ZFC sobre los valores posibles de estos cardinales es lo siguiente:

Teorema 9.2 $\aleph_1 \leq \text{cf } \mathfrak{b} \leq \mathfrak{b} \leq \text{cf } \mathfrak{d} \leq \mathfrak{d} \leq \mathfrak{c}$.

DEMOSTRACIÓN: La última desigualdad es trivial. La desigualdad $\aleph_1 \leq \mathfrak{b}$ significa que toda familia numerable $\{f_n\}_{n \in \omega}$ de funciones en ${}^\omega\omega$ está acotada. En efecto, basta definir $f(n) = \max_{i \leq n} f_i(n)$ y se cumple que $f_n \leq^* f$ para todo n .

Si fuera $\text{cf } \mathfrak{b} < \mathfrak{b}$, podríamos descomponer una familia no acotada \mathcal{B} en unión de $\text{cf } \mathfrak{b}$ familias \mathcal{B}_α de cardinal menor que \mathfrak{b} y, por consiguiente, acotadas. Si f_α es una cota superior para \mathcal{B}_α , la familia $\{f_\alpha \mid \alpha < \text{cf } \mathfrak{b}\}$ estaría acotada, y una cota para esta familia sería una cota para \mathcal{B} , contradicción.

Sea \mathcal{D} una familia dominante de cardinal \mathfrak{d} , y descompongámosla en unión de $\text{cf } \mathfrak{d}$ familias \mathcal{D}_α de cardinal menor que \mathfrak{d} . Entonces, para cada $\alpha < \text{cf } \mathfrak{d}$, existe una f_α que no está dominada por ninguna función de \mathcal{D}_α . Entonces la familia $\{f_\alpha\}_{\alpha < \text{cf } \mathfrak{d}}$ no está acotada, pues si existiera una cota f , podríamos tomar una cota mayor en \mathcal{D} , luego en un \mathcal{D}_α , pero entonces f_α estaría dominada por una función de \mathcal{D}_α , contradicción. Esto prueba que $\mathfrak{b} \leq \text{cf } \mathfrak{d}$. ■

Si $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ todos estos cardinales son trivialmente iguales. Por otra parte:

Teorema 9.3 (AM) $\mathfrak{b} = \mathfrak{d} = \mathfrak{c}$.

DEMOSTRACIÓN: Veamos de hecho que AM(κ) implica que $\kappa < \mathfrak{b}$. Para ello basta probar que toda familia $\mathcal{F} \subset {}^\omega\omega$ de cardinal κ está acotada. Definimos

$$\mathbb{P} = \text{Fn}(\omega, \omega, \aleph_0) \times \mathcal{P}^f \mathcal{F}$$

con el orden dado por

$$(q, B) \leq (p, A) \leftrightarrow p \subset q \wedge A \subset B \wedge \bigwedge f \in A \bigwedge n \in \mathcal{D} q \setminus \mathcal{D} p \quad f(n) < q(n).$$

Podemos pensar en el conjunto A que acompaña a cada p como una “promesa” en el sentido de que p “promete” que todas sus extensiones se mantendrán en sus nuevos valores por encima de las funciones de A .

Obviamente \mathbb{P} es un conjunto parcialmente ordenado con máximo $\mathbb{1} = (\emptyset, \emptyset)$. Veamos que cumple la c.c.n. Para ello sea $\{(p_\alpha, A_\alpha)\}_{\alpha < \omega_1}$ una familia no numerable de condiciones. Como $\text{Fn}(\omega, \omega, \aleph_0)$ es numerable, tiene que haber infinitas con el mismo p_α , en particular tiene que haber dos de la forma (p, A_α) , (p, A_β) , pero entonces $(p, A_\alpha \cup A_\beta)$ es trivialmente una extensión común, luego la familia dada no era una anticadena.

Ahora observamos que los conjuntos $D_n = \{(p, A) \in \mathbb{P} \mid n \in \mathcal{D} p\}$ son densos en \mathbb{P} , pues toda condición (p, A) tal que $n \notin \mathcal{D} p$ puede extenderse a

$(p \cup \{(n, k)\}, A)$, donde k lo tomamos mayor que todos los valores $f(n)$ con $f \in A$.

Por otra parte, si $f \in \mathcal{F}$ también es denso $E_f = \{(p, A) \in \mathbb{P} \mid f \in A\}$, pues $(p, A \cup \{f\}) \leq (p, A)$.

De este modo AM(κ) nos da un filtro G en \mathbb{P} que corta a todos los conjuntos densos que hemos definido. Esto implica que la unión de todas las primeras componentes de las condiciones de G es una función $g \in {}^\omega\omega$ que acota a \mathcal{F} , pues dada cualquier $f \in \mathcal{F}$ existe una condición $(p, A) \in G$ tal que $f \in A$. Sea $k \in \omega$ mayor que todo elemento de \mathcal{D}_p . Entonces, si $n \geq k$, existe $(q, B) \in G$ tal que $n \in \mathcal{D}_q$, y podemos exigir que $(q, B) \leq (p, A)$, con lo que $g(n) = q(n) > f(n)$. Por lo tanto $f \leq^* g$. ■

En la prueba del teorema anterior hemos tenido que trabajar con una familia \mathcal{F} de cardinal menor que 2^{\aleph_0} para que fuera aplicable el axioma de Martin, pero también podemos $\mathcal{F} = {}^\omega\omega$ en un modelo y pasar a una extensión genérica:

Definición 9.4 Llamaremos $\mathbb{P}_{\text{dom}} = \text{Fn}(\omega, \omega, \aleph_0) \times \mathcal{P}^f({}^\omega\omega)$.

Exactamente el mismo argumento empleado en la demostración del teorema anterior prueba que si M es un modelo transitivo numerable de ZFC y G es un filtro $\mathbb{P}_{\text{dom}}^M$ -genérico sobre M , entonces en $M[G]$ la función f_G que resulta de unir todas las primeras componentes de las condiciones en G cumple $f_G \in {}^\omega\omega$ y acota a todas las funciones de $({}^\omega\omega)^M$.

Una función en una extensión genérica que acote a todas las funciones del modelo base se dice que es *dominante*. A menudo se hace referencia a \mathbb{P}_{dom} como “*el c.p.o. que añade (al modelo) una función dominante*”.

Hemos visto que \mathbb{P}_{dom} cumple la c.c.n. y claramente $|\mathbb{P}_{\text{dom}}| = 2^{\aleph_0}$. Por lo tanto \mathbb{P}_{dom} conserva cardinales y cofinalidades y, teniendo en cuenta 5.20 y 5.22, también conserva la función del continuo.

Consideremos la iteración de c.p.o.s $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta < \kappa}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \kappa})$ con soportes finitos tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta = \mathbb{P}_{\text{dom}}$. Llamaremos $\mathbb{P}_{\text{dom}}^\kappa = \mathbb{P}_\kappa$. Por 8.26 sabemos que $\mathbb{P}_{\text{dom}}^\kappa$ cumple también la c.c.n. El mismo razonamiento empleado en la prueba de AM (teorema 8.38) permite probar² que, si $\kappa \leq \mathfrak{c}$, entonces $\mathbb{P}_{\text{dom}}^\kappa$ contiene un subconjunto denso de cardinal \mathfrak{c} , por lo que conserva cardinales, cofinalidades y la función del continuo.

Consideremos ahora un modelo transitivo numerable de ZFC, $\kappa \leq \mathfrak{c}^M$ y G un filtro $(\mathbb{P}_{\text{dom}}^\kappa)^M$ -genérico sobre M . Por 8.23, para cada $\delta < \kappa$, podemos factorizar $M[G_{\delta+1}] = M[G_\delta][H]$, donde H es un filtro $\mathbb{P}_{\text{dom}}^{M[G_\delta]}$ -genérico sobre $M[G_\delta]$, que a su vez determina una función $f_\delta \in ({}^\omega\omega)^{M[G_{\delta+1}]}$ que acota a todas las funciones de $M[G_\delta]$. De este modo, en $M[G]$ tenemos una familia $\{f_\delta\}_{\delta < \kappa}$ de funciones en $({}^\omega\omega)^M$ tales que $\bigwedge \delta \epsilon (\delta \leq \epsilon < \kappa \rightarrow f_\delta \leq^* f_\epsilon)$, y todas ellas son dominantes respecto de M como modelo base.

²Tomamos como κ de 8.38 el cardinal $(\mathfrak{c}^+)^M$. Pasando a un c.p.o. isomorfo podemos suponer que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta = \check{\nu}$, donde $\nu = \mathfrak{c}^M$.

Teorema 9.5 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y en M sea $\kappa \leq \mathfrak{c}$ un cardinal regular no numerable. Sea G un filtro $(\mathbb{P}_{\text{dom}}^{\kappa})^M$ -genérico sobre M . Entonces en $M[G]$ se cumple que $\mathfrak{b} = \mathfrak{d} = \kappa$ y $\mathfrak{c} = \mathfrak{c}^M$.*

DEMOSTRACIÓN: Veamos que familia de funciones $\{f_{\delta}\}_{\delta < \kappa}$ es dominante, lo que prueba que $\mathfrak{d} \leq \kappa$. En efecto, si $g \in (\omega\omega)^{M[G]}$, teniendo en cuenta que $g \subset \omega \times \omega \in M$, el teorema 8.24 nos da un $\delta < \kappa$ tal que $g \in M[G_{\delta}]$ y entonces $g \leq^* f_{\delta}$.

Ahora veamos que si $g : \mu \longrightarrow \omega\omega$ es una función en $M[G]$ con $\mu < \kappa$, entonces $g[\mu]$ está acotado, con lo que podremos concluir que $\kappa \leq \mathfrak{b}$. El argumento es el mismo. Tenemos que g puede codificarse mediante un conjunto $C_g \subset \mu \times \omega \times \omega \in M$ y $|C_g| < \kappa$, luego existe un $\delta < \kappa$ tal que $C_g \in M[G_{\delta}]$, luego $g[\mu] \in M[G_{\delta}]$, luego $g[\mu]$ está acotado por f_{δ} . ■

En particular, vemos que es consistente que $\aleph_1 < \mathfrak{b} = \mathfrak{d} < \mathfrak{c}$. Por otra parte:

Teorema 9.6 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC + HC y $\kappa > \aleph_1^M$ un cardinal en M . Sea $\mathbb{P} = \text{Fn}(\kappa \times \omega, \omega, \aleph_0)$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces en $M[G]$ los cardinales y las cofinalidades son iguales que en M y se cumple $\mathfrak{b} = \aleph_1 < \mathfrak{d} = \mathfrak{c} = \kappa$.*

DEMOSTRACIÓN: Sabemos que \mathbb{P} cumple la c.c.n. en M , luego conserva cardinales y cofinalidades, y el teorema 5.23 nos da que $(\mathfrak{c} = \kappa)^{M[G]}$.

Sea $f : \kappa \times \omega \longrightarrow \omega$ la función genérica determinada por G y consideremos las funciones $f_{\alpha} \in \omega\omega$ dadas por $f_{\alpha}(n) = f(\alpha, n)$.

Vamos a probar que la familia $A = (\omega\omega)^M$, que claramente tiene cardinal \aleph_1 en $M[G]$, no está acotada en $(\omega\omega)^{M[G]}$, lo que probará que $(\mathfrak{b} = \aleph_1)^{M[G]}$.

Supongamos que existe $g \in (\omega\omega)^{M[G]}$ que acota a A . Digamos que $g = \sigma_G$, donde σ es un buen nombre para un subconjunto de $\omega \times \omega$. Como las anticadenas en \mathbb{P} son numerables, existe $I \subset \kappa$ numerable tal que si

$$\mathbb{P}_I = \text{Fn}(I \times \omega, \omega, \aleph_0), \quad \mathbb{P}^I = \text{Fn}((\kappa \setminus I) \times \omega, \omega, \aleph_0),$$

entonces podemos descomponer $\mathbb{P} \cong \mathbb{P}_I \times \mathbb{P}^I$, $M[G] = M[G_I][G^I]$ y $\sigma \in M^{\mathbb{P}_I}$, luego $g \in M[G_I]$ y acota a todas las funciones de A .

Para cada $p \in \mathbb{P}_I$ sea $h_p(n) = \min\{k \in \omega \mid \forall q \in \mathbb{P}_I (q \leq p \wedge q \Vdash \sigma(\check{n}) = \check{k})\}$. Así $\{h_p\}_{p \in \mathbb{P}_I}$ es una familia numerable de funciones en M , luego está acotada por una función $h \in (\omega\omega)^M$. Vamos a probar que h acota a todas las funciones de $(\omega\omega)^M$, lo cual es absurdo. Dada $r \in (\omega\omega)^M$, tenemos que $r \leq^* g$, luego existe un $m \in \omega$ y un $p \in \mathbb{P}_I$ tal que

$$p \Vdash \bigwedge n \in \omega (n \geq m \rightarrow r(n) \leq \sigma(n)).$$

Fijado $n \geq m$, si $q \leq p$ y $k \in \omega$ cumplen $q \Vdash \sigma(\check{n}) = \check{k}$, entonces $r(n) \leq k$, luego $r(n) \leq h_p(n)$, luego $r \leq^* h_p \leq^* h$, contradicción.

Consideremos ahora un cardinal $\mu < \kappa$ y sea $g : \mu \longrightarrow {}^\omega\omega$, $g \in M[G]$. Vamos a probar que $g[\mu]$ no puede ser dominante, con lo que $\mathfrak{d} = \kappa$. En efecto, podemos expresar $g = \sigma_G$, donde σ es un buen nombre para un subconjunto de $\mu \times \omega \times \omega$. Como antes, existe un ordinal $\alpha < \mu$ tal que si llamamos

$$\mathbb{P}_\alpha = \text{Fn}(\alpha \times \omega, \omega, \aleph_0), \quad \mathbb{P}^\alpha = \text{Fn}((\kappa \setminus \alpha) \times \omega, \omega, \aleph_0),$$

podemos descomponer $\mathbb{P} \cong \mathbb{P}_\alpha \times \mathbb{P}^\alpha$ y $\sigma \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$. Si factorizamos la extensión $M[G] = M[G_\alpha][G^\alpha]$, se cumple que $g \in M[G_\alpha]$. Ahora, para cada $m \in \omega$ y $\delta < \mu$, el conjunto

$$D_m^\delta = \{p \in \mathbb{P}^\alpha \mid \forall n \in \omega (n > m \wedge (\alpha, n) \in \mathcal{D}p \wedge p(\alpha, n) > g(\delta)(n)\} \in M[G_\alpha]$$

es denso en \mathbb{P}^α , luego corta a G^α , lo que se traduce en que

$$\bigwedge m \in \omega \bigvee n \in \omega (n > m \wedge f_\alpha(n) > f(\delta)(n)),$$

de modo que no $f_\alpha \leq^* f(\delta)$ para ningún $\delta < \mu$, luego $f[\mu]$ no domina a f_α . ■

Observemos que el teorema anterior proporciona modelos con \mathfrak{d} singular y regular, indistintamente.

El teorema siguiente es elemental:

Teorema 9.7 *Existe una sucesión no acotada $\{f_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$ que sea estrictamente creciente, es decir, tal que $\alpha < \beta \rightarrow f_\alpha <^* f_\beta$.*

DEMOSTRACIÓN: Partimos de una familia no acotada $\{g_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$ y definimos inductivamente la sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$: tomamos $f_0 = g_0$, supuesta definida f_α tomamos una función $f_{\alpha+1}$ que cumpla $f_\alpha <^* f_{\alpha+1}$ y $g_{\alpha+1} \leq^* f_{\alpha+1}$ y, supuesta definida la sucesión $\{f_\delta\}_{\delta < \lambda}$, para $\lambda < \mathfrak{b}$, por esto mismo no puede ser no acotada, luego existe una función f_λ que acota a todos los f_δ , y podemos exigir además que $g_\lambda \leq^* f_\lambda$. Claramente la sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$ es creciente y no puede estar acotada, pues entonces también lo estaría $\{g_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$. ■

Por lo tanto, podríamos haber definido \mathfrak{b} como la menor longitud de una sucesión creciente no acotada en ${}^\omega\omega$. En cambio, esto no es cierto para familias dominantes:

Definición 9.8 Una *escala* es una sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha < \lambda}$ estrictamente creciente y dominante.

Obviamente, si $\{f_\alpha\}_{\alpha < \lambda}$ es una escala, entonces $\mathfrak{d} \leq \lambda$, y tiene una subsucesión $\{f_{\alpha_\delta}\}_{\delta < \mathfrak{d}}$ que sigue siendo una escala. En efecto, tomamos una familia dominante $\{g_\delta\}_{\delta < \mathfrak{d}}$ y definimos como sigue una sucesión estrictamente creciente de ordinales $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \mathfrak{d}}$: si ya está definida $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \beta}$, con $\beta < \mathfrak{d}$, no puede ocurrir que sea cofinal en λ , porque entonces la sucesión $\{f_{\alpha_\delta}\}_{\delta < \beta}$ sería dominante y tendría menos de \mathfrak{d} elementos, luego existe un α_β mayor que todos los términos anteriores de la sucesión, y podemos elegirlo tal que $g_\beta \leq^* f_{\alpha_\beta}$. La sucesión $\{f_{\alpha_\delta}\}_{\delta < \mathfrak{d}}$ así construida cumple lo pedido.

Por lo tanto, si hay escalas, las hay de longitud \mathfrak{d} . Ahora bien:

Teorema 9.9 Existe una escala si y sólo si $\mathfrak{b} = \mathfrak{d}$.

DEMOSTRACIÓN: Si existe una escala, acabamos de ver que existe una de longitud \mathfrak{d} , digamos $\{f_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{d}}$. Sea por otra parte $\{g_\beta\}_{\beta < \mathfrak{b}}$ una familia no acotada. Elijamos α_β tal que $g_\beta \leq^* f_{\alpha_\beta}$. Entonces la familia $\{f_{\alpha_\beta} \mid \beta < \mathfrak{b}\}$ no está acotada, pues una cota lo sería también de $\{g_\beta\}_{\beta < \mathfrak{b}}$, luego el conjunto $\{\alpha_\beta \mid \beta < \mathfrak{b}\}$ es cofinal en \mathfrak{d} , ya que si α fuera una cota, entonces f_α acotaría a $\{f_{\alpha_\beta} \mid \beta < \mathfrak{b}\}$, pero entonces esta familia es dominante, pues dada cualquier $h \in {}^\omega\omega$, existe $\alpha < \mathfrak{d}$ tal que $h \leq^* f_\alpha$ y existe un $\beta < \mathfrak{b}$ tal que $h \leq^* f_\alpha \leq^* f_{\alpha_\beta}$. Tenemos, pues una familia dominante de cardinal \mathfrak{b} , luego $\mathfrak{b} = \mathfrak{d}$.

Recíprocamente, si $\mathfrak{b} = \mathfrak{d}$ existe una familia dominante $\{g_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$ y definimos como sigue una sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$ estrictamente creciente: supuesta definida $\{f_\alpha\}_{\alpha < \beta}$, con $\beta < \mathfrak{b}$, como tiene que estar acotada, podemos tomar una cota f_β que además cumpla $g_\beta \leq^* f_\beta$. La sucesión que obtenemos es dominante, porque domina a $\{g_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$, luego es una escala. ■

Así pues, la existencia de escalas no es demostrable en ZFC, pero se cumple, por ejemplo, bajo AM, o en particular bajo la hipótesis del continuo.

Vamos a considerar ahora otro cardinal característico, relacionado con $\mathcal{P}\omega$ en lugar de con ${}^\omega\omega$.

Definición 9.10 Si $A, B \in \mathcal{P}\omega$, diremos que $A \subset^* B$ (A está *casi contenido* en B) si $A \setminus B$ es finito. Similarmente $A =^* B$ significará que $A \subset^* B \wedge B \subset^* A$ y cuando escribamos $A \not\subset^* B$ habrá que entenderlo como que $A \subset^* B \wedge A \neq^* B$, es decir, como que $A \setminus B$ es finito y $B \setminus A$ es infinito.

Conviene observar que a través del homomorfismo natural $\mathcal{P}\omega \longrightarrow \mathcal{P}\omega/\text{fin}$ dado por $A \mapsto [A]$ (donde fin representa el ideal de los subconjuntos finitos de ω), las relaciones $=^*$, \subset^* y $\not\subset^*$ se corresponden con $=$, \leq y $<$ en el sentido usual en álgebras de Boole.

Una *torre* es una sucesión $\{A_\alpha\}_{\alpha < \beta}$ de subconjuntos infinitos de ω tal que es *casi decreciente* (si $\alpha_1 \leq \alpha_2$ entonces $A_{\alpha_2} \subset^* A_{\alpha_1}$ y A_{α_2}) y además es maximal, en el sentido de que no puede prolongarse.

Definimos \mathfrak{t} como la menor longitud de una torre.

Notemos que no es inmediato que existan torres, pues no estamos excluyendo la posibilidad de que las sucesiones casi decrecientes tengan términos repetidos, luego se pueden formar sucesiones casi decrecientes finalmente constantes de longitud arbitrariamente grande. De hecho, no es trivial construir una sucesión casi decreciente con garantías de que no se va a poder prolongar indefinidamente:

Teorema 9.11 Existe una torre de longitud \mathfrak{c} .

DEMOSTRACIÓN: Fijamos una enumeración $\{A_\alpha\}_{\alpha < 2^{\aleph_0}}$ de $\mathcal{P}\omega$. Supongamos que no existen torres de longitud menor que 2^{\aleph_0} . Entonces definimos como

sigue una sucesión $\{X_\alpha\}_{\alpha < 2^{\aleph_0}}$ casi decreciente de subconjuntos infinitos de ω : partimos de $X_0 = \omega$. Supuesto definido X_α , definimos

$$X_{\alpha+1} = \begin{cases} X_\alpha \cap A_\alpha & \text{si } X_\alpha \cap A_\alpha \text{ es infinito,} \\ X_\alpha \setminus A_\alpha & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Supuesta definida $\{X_\delta\}_{\delta < \lambda}$, con $\lambda < 2^{\aleph_0}$, por hipótesis no puede ser una torre, luego tiene que existir un X_λ casi contenido en todos sus términos, y que nos permite prolongarla.

Así tenemos construida la sucesión $\{X_\alpha\}_{\alpha < 2^{\aleph_0}}$ con la propiedad de que, para todo $A \subset \omega$, existe un α tal que $X_\alpha \subset A$ o bien $X_\alpha \subset \omega \setminus A$. Esto implica que se trata de una torre, pues en caso contrario existiría un X infinito casi contenido en todos los X_α , luego para todo $A \subset \omega$ tendríamos que X está casi contenido en A o bien en $\omega \setminus A$, pero eso es imposible, porque si descomponemos $X = X' \cup X''$, donde los dos conjuntos son infinitos, entonces X no está casi contenido ni en X' ni en $\omega \setminus X'$. ■

Esto ya prueba que t es un ordinal $\leq \mathfrak{c}$. De hecho tiene que ser un ordinal límite, pues toda sucesión decreciente con un último elemento se puede prolongar (por ejemplo repitiendo su último elemento). Más aún, tiene que ser un cardinal regular, pues si $\mathfrak{c} < t < \mathfrak{c}$, podríamos tomar una sucesión $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \lambda}$ co-final creciente en t con $\lambda < t$, y entonces, dada una torre $\{A_\alpha\}_{\alpha < t}$, tendríamos que $\{A_{\alpha_\delta}\}_{\delta < \lambda}$ sería una torre de longitud menor que t , lo cual es absurdo.

Los teoremas siguientes implican que t es no numerable:

Teorema 9.12 Si $\{A_n\}_{n < \omega}$ es una sucesión de subconjuntos de ω tal que la intersección de cualquier cantidad finita de ellos es infinita, entonces existe un $A \subset \omega$ tal que $A \subset^* A_n$ para todo n .

DEMOSTRACIÓN: Sustituyendo A_n por $\bigcap_{k \leq n} A_k$ podemos suponer que la sucesión es decreciente.

Tomamos tomamos $x_0 \in A_0$, $x_1 \in A_1$ tal que $x_1 > x_0$ (lo cual es posible porque A_1 es infinito), y así vamos formando una sucesión creciente $\{x_n\}_{n < \omega}$ tal que $x_n \in A_n$. Entonces $A = \{x_n \mid n \in \omega\}$ cumple lo requerido, pues $A \setminus A_n \subset \{x_0, \dots, x_{n-1}\}$. ■

Por lo tanto:

Teorema 9.13 Sea $\delta < \omega_1$ y sea $\{A_\alpha\}_{\alpha < \delta}$ una sucesión casi decreciente de subconjuntos infinitos de ω . Entonces existe un conjunto infinito $A \subset \omega$ casi contenido en todos los elementos de la sucesión.

DEMOSTRACIÓN: Si renumeramos la sucesión como $\{A_n\}_{n < \omega}$, obtenemos una sucesión de conjuntos que cumple las hipótesis de 9.12. ■

Esto implica que toda torre de longitud numerable se puede prolongar, luego $t \geq \aleph_1$. El teorema siguiente resume lo que hemos obtenido junto con un hecho adicional:

Teorema 9.14 $\aleph_1 \leq \text{cf } t = t \leq \text{cf } b = b \leq \text{cf } d \leq d \leq c$.

DEMOSTRACIÓN: Sólo hay que probar que $t \leq b$. Para ello fijamos un cardinal $\kappa < t$ y vamos a probar que toda familia $\{g_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ de elementos de ${}^\omega\omega$ está acotada.

Vamos a definir recurrentemente una sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha \leq \kappa}$ de funciones en ${}^\omega\omega$ estrictamente crecientes que cumplan:

- a) Si $\alpha < \beta \leq \kappa$, se cumple que $f_\beta[\omega] \subset^* f_\alpha[\omega]$,
- b) Si $\bigwedge n \in \omega f_\alpha(n) \geq \max\{g_\alpha(k) \mid 0 \leq k \leq 2n\}$.

Para ello usamos que $\{f_\delta[\omega]\}_{\delta < \alpha}$ no puede ser una torre, luego existe un conjunto infinito A casi contenido en todos los $f_\delta[\omega]$, lo que nos permite definir

$$f_\alpha(n) = \min\{a \in A \mid \bigwedge m < n a > f_\alpha(m) \wedge \bigwedge k \leq 2n g_\alpha(k) \leq a\}.$$

De este modo, $f_\alpha[\omega] \subset A$ está casi contenido en todos los $f_\delta[\omega]$, luego cumple a), y claramente cumple también b) y es estrictamente creciente. Vamos a ver que f_κ acota la sucesión dada.

Fijamos $\alpha < \kappa$. Como $f_\kappa[\omega] \subset^* f_\alpha[\omega]$ y f_κ es inyectiva, existe $m \in \omega$ tal que $\bigwedge n \in \omega f_\kappa(m+n) \in f_\alpha[\omega]$. Como las dos funciones son estrictamente crecientes esto implica que $\bigwedge n \in \omega f_\kappa(m+n) \geq f_\alpha(n)$. Por lo tanto, si $n \geq 2m$, se cumple que $2(n-m) \geq n$, luego por b) se cumple que

$$f_\kappa(n) = f_\kappa(n-m+m) \geq f_\alpha(n-m) \geq g_\alpha(n),$$

luego $g_\alpha \leq^* f_\kappa$. ■

Por lo tanto el teorema siguiente refina a 9.3:

Teorema 9.15 (AM) $t = c$.

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que $t < 2^{\aleph_0}$ y sea $\{X_\alpha\}_{\alpha < t}$ una torre. Vamos a encontrar un conjunto infinito casi contenido en todos los X_α , con lo que tendremos una contradicción. Sea

$$F = \{X \subset \omega \mid \bigvee \alpha < t X_\alpha \setminus X \text{ es finito}\},$$

que es un filtro no principal en ω . Sea

$$\mathbb{P} = \{(s, X) \mid s \in {}^{\mathcal{P}^f\omega} \wedge X \in F \wedge \max s < \min X\},$$

con la relación de orden dada por $(t, Y) \leq (s, X)$ si y sólo si $s \subset t$, $Y \subset X$, $t \setminus s \subset X$. Así \mathbb{P} es un c.p.o. con máximo $\mathbf{1} = (\emptyset, \omega)$.

Es fácil ver que \mathbb{P} cumple la c.c.n. En efecto, si A es una anticadena no numerable en \mathbb{P} , tiene que contener infinitos pares de la forma (s, X) para un mismo s fijo, pero si (s, X) , (s, Y) son dos de ellos, entonces $(s, X \cap Y)$ es una extensión común, con lo que tenemos una contradicción.

Por consiguiente, podemos aplicar AM a \mathbb{P} . Para ello observamos que los conjuntos

$$D_\alpha = \{(s, X) \in \mathbb{P} \mid X \subset X_\alpha\}$$

son densos en \mathbb{P} . Basta observar que si $(s, X) \in \mathbb{P}$, entonces $(s, X \cap X_\alpha) \in D_\alpha$. Igualmente, los conjuntos

$$E_n = \{(s, X) \in \mathbb{P} \mid \max s > n\}$$

son densos, pues si $(s, X) \in \mathbb{P}$, como X es infinito, hay un $m \in X$ tal que $m > n$, y entonces $(s \cup \{m\}, X) \in E_n$.

El axioma de Martin nos da un filtro G en \mathbb{P} que corta a todos estos conjuntos densos, y vamos a probar que el conjunto

$$A = \bigcup_{(s, X) \in G} s$$

es infinito y está casi contenido en todos los X_α . En efecto, como $G \cap E_n \neq \emptyset$, tenemos que A no está acotado en ω , luego es infinito. Por otro lado, podemos tomar $(s, X) \in G \cap D_\alpha$, y entonces $A \setminus s \subset X_\alpha$, pues si $n \in A \setminus s$, por definición de A existe $(t, Y) \in G$ tal que $n \in t$, y no perdemos generalidad si suponemos que $(t, Y) \leq (s, X)$, con lo que $n \in t \setminus s \subset X \subset X_\alpha$. ■

El teorema siguiente introduce una restricción sobre los valores posibles para el cardinal \mathfrak{t} :

Teorema 9.16 *Si $\aleph_0 \leq \kappa < \mathfrak{t}$, entonces $2^\kappa = \mathfrak{c}$.*

DEMOSTRACIÓN: Obviamente $2^\kappa \geq \mathfrak{c}$, luego sólo tenemos que probar la desigualdad opuesta. Para ello definimos una sucesión de familias $\{A_f\}_{f \in {}^\alpha 2}$ de subconjuntos infinitos de ω , para $\alpha \leq \kappa$, tales que

- a) Si $f \in {}^\alpha 2$ y $\beta < \alpha$ se cumple $A_f \subset^* A_{f|_\beta}$.
- b) Si $f, g \in {}^\alpha 2$ y $f \neq g$, entonces $A_f \cap A_g$ es finito.

Admitiendo esto, el apartado b) para $\alpha = \kappa$ nos da que $2^\kappa \leq |\mathcal{P}\omega| = \mathfrak{c}$.

Para $\alpha = 0$ basta tomar $A_\emptyset = \omega$. Si α es un límite basta tener en cuenta que, para cada $f \in {}^\alpha 2$, la sucesión casi decreciente $\{A_{f|\delta}\}_{\delta < \alpha}$ no puede ser una torre, por lo que existe un conjunto infinito A_f casi contenido en todos sus términos. Claramente los $\{A_f\}_{f \in {}^\alpha 2}$ así definidos cumplen a) y también b), pues si $f \neq g$ existe un $\delta < \alpha$ tal que $f|_\delta \neq g|_\delta$, luego $A_f \cap A_g \subset^* A_{f|\delta} \cap A_{g|\delta}$ finito.

Supongamos finalmente que $\alpha = \beta + 1$. Entonces cada $f \in {}^\beta 2$ tiene dos extensiones f_0 y f_1 a ${}^\alpha 2$, y tomamos como A_{f_0} y A_{f_1} dos subconjuntos infinitos disjuntos de A_f . Así se cumple claramente a), y para probar b) tomamos $f \neq g$ y consideramos el mínimo δ tal que $f|_\delta \neq g|_\delta$. Si $\delta = \alpha$ entonces $A_f \cap A_g = \emptyset$, y si $\delta \leq \beta$, entonces $A_{f|\delta} \cap A_{g|\delta}$ es finito por construcción, y lo mismo vale para $A_f \cap A_g$ por a). ■

Así, por ejemplo, si $2^{\aleph_0} < 2^{\aleph_1}$ tiene que ser $\mathfrak{t} = \aleph_1$. Por ejemplo, el teorema 9.5 nos permite construir un modelo en el que $\mathfrak{b} = \mathfrak{d} = \aleph_3$, $\mathfrak{c} = \aleph_5$ y $2^{\aleph_1} = \aleph_6$, y entonces, por la observación que acabamos de hacer, se cumplirá $\mathfrak{t} = \aleph_1$. En definitiva, tenemos que es consistente

$$\mathfrak{t} < \mathfrak{b} = \mathfrak{d} < \mathfrak{c}$$

Otra consecuencia elemental del teorema anterior es que $\mathfrak{t} \leq \text{cf } \mathfrak{c}$, pues si $\kappa < \mathfrak{t}$ entonces $\text{cf } \mathfrak{c} = \text{cf } 2^\kappa > \kappa$. Veamos otro contexto en el que se cumple $\mathfrak{t} = \aleph_1$:

Teorema 9.17 *Si T es un árbol de Suslin y \mathbb{P} es T con el orden inverso, entonces $1_{\mathbb{P}} \Vdash \mathfrak{t} = \aleph_1$.*

DEMOSTRACIÓN: Observemos que podemos construir un árbol de Suslin T' isomorfo a T cuyos nodos sean elementos de $[\omega]^{\aleph_0}$ y en el que el orden sea la inversa de \subset^* . Para ello llamamos T_α al conjunto de los elementos de T de altura $\leq \alpha$ y vamos a ir definiendo una sucesión creciente de árboles T'_α junto con isomorfismos $j_\alpha : T_\alpha \longrightarrow T'_\alpha$, para $\alpha < \omega_1$. Cada nivel de T'_α será una familia de subconjuntos infinitos de ω casi disjuntos dos a dos (es decir, con intersección finita).

Podemos suponer que T tiene una única raíz (añadiéndole un mínimo si hace falta). Así, podemos definir $T'_0 = \{\omega\}$, con el isomorfismo obvio.

Supuesto definido $j_\alpha : T_\alpha \longrightarrow T'_\alpha$, cada elemento $p \in T_\alpha$ de altura α puede tener por encima a lo sumo una cantidad numerable de elementos de altura $\alpha + 1$, y $j_\alpha(p)$ es un conjunto infinito, que puede dividirse en una cantidad finita o numerable de subconjuntos infinitos disjuntos dos a dos, que pueden hacerse corresponder con las extensiones de p , lo que nos permite extender j_α a un isomorfismo $j_{\alpha+1} : T_{\alpha+1} \longrightarrow T'_{\alpha+1}$.

Si tenemos definidos los isomorfismos $j_\delta : T_\delta \longrightarrow T'_\delta$ para todo $\delta < \lambda$, de modo que cada uno extiende a los anteriores, empezamos formando el isomorfismo $j_\lambda^* = \bigcup_{\delta < \lambda} j_\delta : \bigcup_{\delta < \lambda} T_\delta \longrightarrow \bigcup_{\delta < \lambda} T'_\delta$, pero tenemos que extenderlo a los elementos de altura λ para que el dominio sea T_λ . Cada $p \in T_\lambda$ de altura λ tiene por debajo una cadena C que se corresponde a través de j_λ^* con una sucesión casi decreciente de subconjuntos infinitos de ω . Como no puede ser una torre (porque es numerable), existe un conjunto infinito $j_\lambda^*(C)$ casi contenido en todos ellos. Ahora bien, en principio diferentes condiciones p (pero sólo una cantidad numerable de ellas) podrían tener por debajo la misma cadena C , or lo que hay que partir $j_\lambda^*(C)$ en tantos conjuntos infinitos disjuntos dos a dos como sea necesario para asignar uno a cada condición p sobre C . Esto define el isomorfismo j_λ .

Por último, uniendo todos los isomorfismos j_α obtenemos el isomorfismo $j : T \longrightarrow T'$ requerido. Podemos cambiar T por T' y suponer directamente que T está formado por abiertos infinitos en ω con el orden dado por la inversa de \subset^* . Por lo tanto el orden de \mathbb{P} es \subset^* .

Si relativizamos todo esto a un modelo M y tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces $G = \{A_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ es una sucesión casi decreciente de subconjuntos de ω . Basta probar que es una torre. En efecto, en caso contrario existe un $A \subset \omega$ infinito casi contenido en todos los A_α . En principio $A \in M[G]$, pues tendríamos una contradicción si $A \in M$, ya que entonces podríamos definir $G = \{p \in T \mid A \subset^* p\}$, con lo que T tendría un camino en M , en contradicción con que era un árbol de Suslin en M . Ahora bien, el teorema siguiente nos permite probar que $A \in M$, y con esto tenemos la contradicción buscada. ■

Teorema 9.18 *Si M es un modelo transitivo numerable de ZFC, T es un árbol de Suslin en M y \mathbb{P} es T con el orden inverso, entonces, si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , se cumple $(\mathcal{P}\omega)^{M[G]} = (\mathcal{P}\omega)^M$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $A \in (\mathcal{P}\omega)^{M[G]}$ y sea $f : \omega \longrightarrow A$ suprayectiva, con $f \in M[G]$. Sea $f = \sigma_G$, de modo que $\mathbb{1} \Vdash \sigma : \omega \longrightarrow \omega$.

Para cada $n \in \omega$, existe $p_n \in G$ tal que $p_n \Vdash \sigma(\check{n}) = \check{k}$, donde $k = f(n)$. La sucesión $\{p_n\}_{n \in \omega}$ puede tomarse en $M[G]$. Como es numerable, las alturas de las condiciones p_n estarán acotadas por un $\alpha < \omega_1^{M[G]} = \omega_1^M$. Pero, por genericidad, G tiene elementos de todas las alturas posibles (es un camino en el árbol T), luego existe una condición $p \in G$ de altura mayor que todas las p_n , es decir, $p \leq p_n$ para todo n . Pero entonces

$$A = \{k \in \omega \mid p \Vdash \forall n \in \omega \ p \Vdash \sigma(\check{n}) = \check{k}\} \in M. \quad \blacksquare$$

9.2 *p*-puntos en ω^*

El concepto de torre que hemos estudiado en la sección anterior tiene una interpretación topológica natural en el espacio $\omega^* = \beta\omega \setminus \omega$, es decir, el espacio de Stone del álgebra de Boole $\mathcal{P}\omega/\text{fin}$ (véase [TC 10.64]).

Recordemos que tenemos un isomorfismo $\mathcal{P}\omega \longrightarrow \mathbb{B}$, donde \mathbb{B} es el álgebra de abiertos-cerrados de $\beta\omega$, que a cada $A \subset \omega$ le asigna su clausura \overline{A} , que es abierta y cerrada en $\beta\omega$. Si pasamos a $A^* = \overline{A} \setminus A = \overline{A} \cap \omega^*$, tenemos un epimorfismo en el álgebra \mathbb{B}^* de abiertos cerrados de ω^* , que a su vez induce un isomorfismo de álgebras $\mathcal{P}\omega/\text{fin} \longrightarrow \mathbb{B}^*$.

De este modo, una casi inclusión $A \subset^* B$ se corresponde con una inclusión $A^* \subset B^*$ entre los abiertos-cerrados correspondientes en ω^* , y las torres se corresponden con familias decrecientes maximales de abiertos-cerrados.

En general, un *p-punto* en un espacio topológico es un punto x con la propiedad de que la intersección de cualquier familia numerable de entornos de x es un entorno de x .

Teniendo en cuenta que una base de ω^* la forman los conjuntos $A^* = \overline{A} \setminus A$, con $A \subset \omega$, un punto $x \in \omega^*$ será un *p-punto* si y sólo si para toda familia $\{A_n\}_{n \in \omega}$ de subconjuntos de ω tales que $x \in A_n^*$, existe un $A \subset \omega$ tal que $x \in A^* \subset \bigcap_n A_n^*$. Equivalentemente:

(A) *Un p-punto x en ω^* es un ultrafiltro no principal en ω tal que para toda familia $\{A_n\}_{n \in \omega}$ de elementos de x existe un $A \in x$ tal que $A \subset^* A_n$ para todo n .*

Cambiando los A_n por sus complementarios $\omega \setminus A_n$ tenemos una definición equivalente:

(B) *Un p-punto x en ω^* es un ultrafiltro no principal en ω tal que para toda familia $\{A_n\}_{n \in \omega}$ de conjuntos que no están en x existe un $A \in x$ tal que cada $A \cap A_n$ es finito.*

Nota En (A) podemos exigir además que la familia sea decreciente, mientras que en (B) podemos exigir que sea una partición de ω . En efecto, en (A) cambiamos A_n por $\tilde{A}_n = \bigcap_{k \leq n} A_k$. Si $A \in x$ cumple que cada $A \subset^* \tilde{A}_n$, como $\tilde{A}_n \subset A_n$, también $A \subset^* A_n$.

En cuanto a (B), no perdemos generalidad si suponemos $\bigcup_{n < \omega} A_n = \omega$, pues si no se cumple esto siempre podemos añadir a la familia los conjuntos $\{k\}$ tales que $k \in \omega \setminus \bigcup_{n < \omega} A_n$.

Admitiendo esta propiedad adicional, cambiamos A_n por $\tilde{A}_n = A_n \setminus \bigcup_{k < n} A_k$, con lo que tenemos una partición de ω formada por elementos que no están en el ultrafiltro x . Si existe un $A \in x$ tal que cada $A \cap \tilde{A}_n$ es finito, como

$$A \cap A_n = \bigcup_{k \leq n} (A \cap \tilde{A}_n),$$

resulta que cada $A \cap A_n$ también es finito. ■

Teorema 9.19 *Existen puntos de ω^* que no son p-puntos.*

DEMOSTRACIÓN: Fijamos una partición $\{A_n\}_n$ de ω en conjuntos infinitos y definimos

$$F = \{X \in \mathcal{P}\omega \mid \{k \in \omega \mid A_k \setminus X \text{ es infinito}\} \text{ es finito}\}.$$

Notemos que se trata de un filtro en ω que contiene a todos los conjuntos cofinitos, y todo ultrafiltro x que contiene a F es no principal, pero cumple (B) para la partición dada. En efecto, $\omega \setminus A_n \in F \subset x$, luego $A_n \notin x$, pero si $A \subset \omega$ cumple que cada $A \cap A_n$ es finito, entonces $\omega \setminus A \in F \subset x$, luego $A \notin x$. ■

En ZFC no puede probarse que ω^* contenga p-puntos, pero sí algo un poco más débil, que es la traducción topológica del teorema 9.12:

Teorema 9.20 *Toda intersección numerable de entornos de un punto de ω^* tiene interior no vacío.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $p \in \omega^*$. No perdemos generalidad si suponemos que los entornos son abiertos básicos, es decir, conjuntos de la forma $\{A_n^*\}_{n \in \omega}$, donde $A_n \subset \omega$ es un conjunto infinito, porque $A_n^* \neq \emptyset$. Como

$$p \in \bigcap_{n \leq m} A_n^* = \left(\bigcap_{n \leq m} A_n \right)^*,$$

concluimos que las intersecciones finitas de conjuntos A_n son infinitas, luego por el teorema 9.12 existe un A infinito tal que $A^* \subset A_n^*$ para todo n , luego $A^* \neq \emptyset$ está contenido en el interior de la intersección. ■

En las condiciones del teorema anterior, para que p sea un p -punto haría falta que p estuviera siempre en el interior de la intersección, cosa que no tiene por qué ocurrir.

Teorema 9.21 *Si $t = c$, existen p -puntos en ω^* .*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\{A_\alpha\}_{\alpha < c}$ una enumeración de $\mathcal{P}\omega$. Definimos como sigue una sucesión $\{X_\alpha\}_{\alpha < c}$ casi decreciente de subconjuntos infinitos de ω : Tomamos $X_0 = \omega$. Supuesto definido X_α (infinito), definimos

$$X_{\alpha+1} = \begin{cases} X_\alpha \cap A_\alpha & \text{si } X_\alpha \cap A_\alpha \text{ es infinito,} \\ X_\alpha \setminus A_\alpha & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Claramente $X_{\alpha+1}$ es infinito y $X_{\alpha+1} \subset X_\alpha$. Supuesto definido $\{X_\delta\}_{\delta < \lambda}$ casi decreciente, con $\lambda < c$, la hipótesis $t = c$ implica que no es una torre, luego podemos prolongarla con un X_λ infinito casi contenido en todos los conjuntos precedentes.

Consideremos ahora

$$U = \{X \subset \omega \mid \forall \alpha < c \ X_\alpha \setminus X \text{ es finito}\}.$$

Vamos a probar que U es un p -punto en ω^* . Claramente es un filtro no principal, y es un ultrafiltro, pues todo $A \subset \omega$ es de la forma A_α , para cierto $\alpha < c$, y entonces, o bien $X_\alpha \subset A_\alpha$, o bien $X_\alpha \subset \omega \setminus A_\alpha$, luego $A \in U$ o bien $\omega \setminus A \in U$.

Para probar que es un p -punto tomamos una familia $\{B_n\}_{n \in \omega}$ de elementos de U , de modo que para cada n existe un $\alpha_n < c$ tal que $X_{\alpha_n} \subset^* B_n$. Sea $\alpha = \sup_n \alpha_n < c$ (donde usamos que $\text{cf } c > \aleph_0$). Entonces $X_\alpha \in U$ está casi contenido en todos los X_{α_n} y, por lo tanto, en todos los B_n . ■

Así pues, la existencia de p -puntos se sigue de AM (y en particular de HC) y es consistente con cualquier valor regular para 2^{\aleph_0} . La consistencia de que no existan p -puntos es más difícil de probar. Veremos la demostración en el capítulo XI.

Ejercicio: Probar que si existe un p -punto en ω^* , entonces el conjunto de los p -puntos es denso en ω^* .

En realidad la hipótesis del teorema anterior se puede debilitar. Para ello demostramos un resultado previo:

Teorema 9.22 *Sea F un filtro en ω no principal generado por menos de \aleph_0 conjuntos, y sea $\{A_n\}_{n \in \omega}$ una familia de elementos de F . Entonces existe $A \subset \omega$ infinito tal que $A \subset^* A_n$ para todo n y además, para todo $Y \in F$ se cumple que $A \cap Y$ es infinito.*

DEMOSTRACIÓN: No perdemos generalidad si suponemos que la familia dada es decreciente, es decir, que $A_{n+1} \subset A_n$. Para cada $Y \in F$ sea $g_Y \in {}^\omega\omega$ la función dada por $g_Y(n) = \min(Y \cap A_n)$. Notemos que la intersección es no vacía porque ambos conjuntos están en F . Además, si $Y \subset Y'$, entonces $g_{Y'}(n) \leq g_Y(n)$, para todo n .

Estamos suponiendo que F está generado por una familia de menos de \aleph_0 conjuntos. Esto significa que todo elemento de F contiene a una intersección finita de elementos de la familia. Ahora bien, las intersecciones finitas de la familia forman otra familia B , también de menos de \aleph_0 elementos, de modo que todo elemento de F contiene a un elemento de B . La familia $\{f_Y\}_{Y \in B}$ no es dominante, luego existe una función $f \in {}^\omega\omega$ tal que $\neg f \leq^* g_Y$, para todo $Y \in B$, luego lo mismo vale para todo $Y \in F$.

Sea $A = \bigcup_{n \in \omega} (A_n \cap f(n))$. Puesto que la familia dada es decreciente, es obvio que $A \subset^* A_n$. Dado $Y \in F$, tenemos que $\neg f \leq^* g_Y$, luego existen naturales arbitrariamente grandes para los que $g_Y(n) = \min(Y \cap A_n) < f(n)$, lo que implica que $A \cap Y$ contiene naturales arbitrariamente grandes. En particular A es infinito. ■

Con esto ya podemos probar:

Teorema 9.23 *Se cumple $\aleph_0 = \aleph_1$ si y sólo si todo filtro no principal en ω generado por menos de \aleph_0 conjuntos se puede extender hasta un p -punto. En particular, en tal caso existen p -puntos.*

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que $\aleph_0 = \aleph_1$ y sea $\{X_\alpha\}_{\alpha < \aleph_1}$ una enumeración de todos los subconjuntos numerables (incluyendo los finitos) de $[\omega]^{\aleph_0}$. Sea F_0 cualquier filtro no principal generado por menos de \aleph_0 conjuntos. Vamos a construir una sucesión creciente de filtros $\{F_\alpha\}_{\alpha \leq \aleph_1}$ generados por menos de \aleph_0 conjuntos. Partimos del filtro dado F_0 . Supuesto definido F_α , distinguimos dos casos:

1) $F_\alpha \cup X_\alpha$ tiene la propiedad de la intersección finita. Entonces la unión genera un filtro generado por menos de \aleph_0 conjuntos, y podemos aplicar el teorema anterior para obtener un $C_{\alpha+1} \subset \omega$ tal que $\{C_{\alpha+1}\} \cup F_\alpha$ tiene la propiedad de la intersección finita y $C_{\alpha+1}$ está casi contenido en todos los elementos de X_α . Definimos $F_{\alpha+1}$ como el filtro generado por $\{C_{\alpha+1}\} \cup F_\alpha$, que admite un generador con menos de \aleph_0 elementos.

2) Si $F_\alpha \cup X_\alpha$ no tiene la propiedad de la intersección finita definimos simplemente $F_{\alpha+1} = F_\alpha$.

Para ordinales límite definimos $F_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} F_\delta$, que claramente es un filtro generado por menos de \aleph_0 conjuntos.

Entonces $U = F_\mathfrak{c}$ es un p -punto que extiende a F_0 . En efecto, es claramente un filtro no principal. Si $A \subset \omega$ es infinito, existe un $\alpha < \mathfrak{c}$ tal que $X_\alpha = \{A\}$, y entonces, por construcción, o bien $A \in F_{\alpha+1} \subset U$, o bien existe un $Y \in F_\alpha$ tal que $A \cap Y$ es finito, en cuyo caso $Y \setminus (A \cap Y) \subset \omega \setminus A \in F_\beta \subset U$. Por lo tanto, U es un ultrafiltro.

Por último, si X es una familia numerable de elementos de U , existe un $\alpha < \mathfrak{c}$ tal que $X = X_\alpha$. Entonces $F_\alpha \cup X_\alpha \subset U$ tiene la propiedad de la intersección finita, luego $C_{\alpha+1} \in U$ está casi contenido en todos los elementos de X .

Esto termina la prueba de una implicación. Para probar la contraria tomemos una familia $E \subset \omega^\omega$ de cardinal menor que \mathfrak{c} y veamos que no es dominante. Para cada $f \in E$ y cada $n \in \omega$ definimos:

$$X_f = \{(n, k) \in \omega \times \omega \mid f(n) < k\}, \quad X_n = \{(m, k) \in \omega \times \omega \mid n \leq m\},$$

y sea

$$\mathcal{C} = \{X_f \mid f \in E\} \cup \{X_n \mid n \in \omega\} \cup \{z \in \mathcal{P}(\omega \times \omega) \mid (\omega \times \omega) \setminus z \text{ es finito}\}.$$

Claramente $|\mathcal{C}| < \mathfrak{c}$, todos sus elementos son infinitos, contiene a todos los subconjuntos cofinitos de $\omega \times \omega$ y tiene la propiedad de la intersección finita. Por lo tanto, \mathcal{C} genera un filtro en $\omega \times \omega$ que por hipótesis puede extenderse hasta un p -punto U (para aplicar la hipótesis habría que traducir \mathcal{C} a un filtro en ω mediante una biyección $\omega \times \omega \rightarrow \omega$, lo cual no ofrece ninguna dificultad).

Sea $U_n = \{n\} \times \omega$, de modo que $\{U_n\}_{n \in \omega}$ es una partición de $\omega \times \omega$, y ningún U_n pertenece a U , pues $U_n \cap X_n = \emptyset$. Como U es un p -punto, existe un $Y \in U$ tal que $Y \cap U_n$ es finito para todo n . Definimos $g \in \omega^\omega$ mediante

$$g(n) = \max\{k \in \omega \mid (n, k) \in Y \cap U_n\}.$$

Como $Y \in U$, para cada $f \in E$, se cumple que $Y \cap X_f$ es infinito, pero

$$(n, k) \in Y \cap X_f \leftrightarrow (n, k) \in Y \wedge f(n) < k.$$

Como en Y sólo hay un número finito de pares con una misma primera componente n , tiene que haber infinitos $n \in \omega$ que aparezcan como primera componente de un par de $Y \cap X_f$, y para cada uno de estos pares se cumple que $g(n) \geq k > f(n)$. Así pues, g no está dominada por ninguna $f \in E$. ■

9.3 Huecos en ω^ω o en $\mathcal{P}\omega$

La completitud de \mathbb{R} puede expresarse diciendo que \mathbb{R} no tiene “huecos”, en el sentido de que dadas dos sucesiones $\{a_n\}_{n \in \omega}$ y $\{b_n\}_{n \in \omega}$ de números reales tales que $a_n \leq a_{n+1} \leq b_{n+1} \leq b_n$ para todo n , siempre existe un $r \in \mathbb{R}$ tal que $a_n \leq r \leq b_n$ para todo n .

Sucede (lo veremos enseguida) que esto mismo es cierto en ω^ω o en $\mathcal{P}\omega$ respecto a la relación \leq^* o \subset^* , respectivamente, lo que podría llevarnos a pensar

que estos conjuntos ordenados también son “completos” en un sentido análogo en el que \mathbb{R} lo es. Sin embargo, esta conclusión sería más aparente que real, pues se viene abajo si consideramos sucesiones “más largas”:

Definición 9.24 Una *sección* en ${}^\omega\omega$ de tipo (κ, μ) es un par de sucesiones $(\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{g_\beta\}_{\beta < \mu})$ de modo que si $\alpha < \alpha' < \kappa$ y $\beta < \beta' < \mu$, entonces

$$f_\alpha <^* f_{\alpha'} \leq^* g_{\beta'} <^* g_\beta.$$

Un *hueco* de tipo (κ, λ) en ${}^\omega\omega$ es una sección tal que no existe ninguna función $h \in {}^\omega\omega$ tal que, la *separe*, es decir, que para cada $\alpha < \kappa$ y cada $\beta < \lambda$, se cumpla $f_\alpha \leq^* h \leq^* g_\beta$.

Análogamente se definen las secciones y los huecos en $\mathcal{P}\omega$, considerando la relación \subset^* en lugar de \leq^* . Más en general, podemos definir estos conceptos en $\mathcal{P}A$, para cualquier conjunto A .

Vamos a demostrar que existen huecos, pero antes conviene hacer algunas observaciones generales. Es evidente que no existen huecos con κ o μ finitos, pues si, por ejemplo, una sección cumple que $\kappa = n+1$ es finito, entonces $h = f_n$ prueba que la sección no es un hueco. Por el mismo motivo κ y μ tienen que ser ordinales límite.

Más aún, si $(\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{g_\beta\}_{\beta < \mu})$ es un hueco y $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \text{cf } \kappa}, \{\beta_\epsilon\}_{\epsilon < \text{cf } \mu}$ son sucesiones cofinales crecientes en κ y μ , respectivamente, es evidente que el par $(\{f_{\alpha_\delta}\}_{\delta < \text{cf } \kappa}, \{g_{\beta_\epsilon}\}_{\epsilon < \text{cf } \mu})$ es también un hueco (esencialmente “el mismo”), por lo que no perdemos generalidad si consideramos únicamente posibles huecos de tipo (κ, μ) con κ y μ cardinales regulares, que necesariamente no podrán ser mayores que \mathfrak{c} . Lo mismo vale para huecos en $\mathcal{P}\omega$.

Otro hecho básico es que si existe un hueco de tipo (κ, μ) , también existe otro de tipo (μ, κ) . Esto es especialmente evidente en $\mathcal{P}\omega$, donde basta pasar de $(\{A_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{B_\beta\}_{\beta < \mu})$ a $(\{\omega \setminus B_\beta\}_{\beta < \mu}, \{\omega \setminus A_\alpha\}_{\alpha < \kappa})$.

En ${}^\omega\omega$ hay que hacer un pequeño “truco” y pasar de $(\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{g_\beta\}_{\beta < \mu})$ a $(\{g_0 - g_\beta\}_{\beta < \mu}, \{g_0 - f_\alpha\}_{\alpha < \kappa})$, donde, para $h \leq^* g_0$, definimos

$$(g_0 - h)(n) = \begin{cases} g_0(n) - h(n) & \text{si } h(n) \leq g_0(n), \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Los resultados sobre existencia o no existencia de huecos de un determinado tipo valen indistintamente para ${}^\omega\omega$ o $\mathcal{P}\omega$. La razón es que podemos conectar como sigue ambos espacios:

Por una parte, tenemos la aplicación $\mathcal{P}\omega \rightarrow {}^\omega\omega$ (inyectiva) que a cada conjunto A le hace corresponder su función característica χ_A . Es inmediato que

$$A \subset B \leftrightarrow \chi_A \leq \chi_B, \quad A \subset^* B \leftrightarrow \chi_A \leq^* \chi_B.$$

Si $(\{A_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{B_\beta\}_{\beta < \mu})$ es un hueco en $\mathcal{P}\omega$, es fácil comprobar que el par $(\{\chi_{A_\alpha}\}_{\alpha < \kappa}, \{\chi_{B_\beta}\}_{\beta < \mu})$ es un hueco (del mismo tipo) en ${}^\omega\omega$. En efecto, si existiera una función h “en el hueco”, como $\chi_{A_0} \leq^* h \leq^+ \chi_{B_0}$, h sólo tomaría los

valores 0, 1 salvo a lo sumo en un número finito de casos, y podemos modificarla en esos casos sin que deje de estar “en el hueco”. Entonces $h = \chi_A$, para cierto $A \subset \omega$ que, ciertamente, estaría “en el hueco” dado.

Por otra parte consideramos $I : \omega^\omega \rightarrow \mathcal{P}(\omega \times \omega)$ dada por $I_f = \{(m, n) \in \omega \times \omega \mid n \leq f(m)\}$. Es inmediato que I es inyectiva, y además

$$f \leq q \leftrightarrow I_f \subset I_g, \quad f \leq^* g \leftrightarrow I_f \subset^* I_g.$$

Fijada cualquier biyección $h : \omega \times \omega \rightarrow \omega$, podemos llamar $I'_f = h[I_f]$, y entonces tenemos una aplicación inyectiva $I' : \omega^\omega \rightarrow \mathcal{P}\omega$ que sigue cumpliendo

$$f \leq q \leftrightarrow I'_f \subset I'_g, \quad f \leq^* g \leftrightarrow I'_f \subset^* I'_g.$$

Esta aplicación nos permite transformar huecos en ω^ω en huecos en $\mathcal{P}\omega$ del mismo tipo.

Al principio de la sección hemos afirmado lo que en términos de huecos se expresa diciendo que no existen huecos de tipo (\aleph_0, \aleph_0) . Esto es consecuencia del teorema siguiente, que de paso prueba también que existen huecos:

Teorema 9.25 \mathfrak{b} es el menor cardinal κ tal que existe un hueco de tipo (κ, ω) .

DEMOSTRACIÓN: Veamos en primer lugar que existe un hueco de tipo (\mathfrak{b}, ω) en $\mathcal{P}\omega$. Por comodidad construiremos uno en $\mathcal{P}(\omega \times \omega)$, pero es claro que se puede transportar trivialmente a $\mathcal{P}\omega$ a través de una biyección $\omega \times \omega \rightarrow \omega$.

Sea $\{f_\alpha\}_{\alpha < \mathfrak{b}}$ una sucesión creciente y no acotada en ω^ω , y consideremos la sucesión creciente en $\mathcal{P}(\omega \times \omega)$ dada por $E_n = \{(i, j) \in \omega \times \omega \mid i \leq n\}$. Sea $F_n = (\omega \times \omega) \setminus E_n$.

Es claro que $(\{I_{f_\alpha}\}_{\alpha < \mathfrak{b}}, \{F_n\}_{n \in \omega})$ es una sección en $\mathcal{P}(\omega \times \omega)$. Supongamos que no es un hueco, de modo que existe un conjunto $C \subset \omega \times \omega$ tal que $I_{f_\alpha} \subset^* C$ para todo $\alpha < \mathfrak{b}$ y $C \subset^* F_n$. Entonces $C \cap E_n$ es finito para todo n y podemos definir

$$g(n) = \max\{j \in \omega \mid (n, j) \in C \cap E_n\},$$

entendiendo que $g(n) = 0$ si el conjunto es vacío. Existe un $\alpha < \mathfrak{b}$ tal que $\neg I_{f_\alpha} \leq^* g$, pues hemos tomado una sucesión no acotada. Pero esto implica que $\neg I_{f_\alpha} \subset^* C$, y tenemos una contradicción.

Consideraremos ahora una sección $(\{A_n\}_{n < \omega}, \{B_\alpha\}_{\alpha < \kappa})$ en $\mathcal{P}\omega$ con $\kappa < \mathfrak{b}$. Definimos $f_\alpha : \omega \rightarrow \omega$ mediante $f_\alpha(n) = 1 + \max(A_n \setminus B_\alpha)$, entendiendo que el máximo de \emptyset es 0.

Como la familia $\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ no puede ser no acotada, existe un $g \in \omega^\omega$ tal que $f_\alpha \leq^* g$ para todo $\alpha < \kappa$. Sea $C = \bigcup_{n \in \omega} (A_n \setminus g(n))$. Claramente $A_n \subset^* C$, para todo n . Además, si $\alpha < \kappa$, tenemos que

$$f_\alpha(n) = 1 + \max(A_n \setminus B_\alpha) \leq g(n)$$

para casi todo n , luego $A_n \setminus g(n) \subset B_\alpha$ para casi todo n , y las excepciones cumplen igualmente que $A_n \setminus g(n) \subset A_n \subset^* B_\alpha$, luego $C \subset^* B_\alpha$. Esto prueba que C separa la sección dada y ésta no es un hueco. ■

Podría pensarse que el mínimo cardinal tal que existe un hueco de tipo (κ, \aleph_1) es otro cardinal característico del continuo que puede tomar valores diferentes, como sucede con \mathfrak{b} , pero no es así:

Teorema 9.26 (Hausdorff) *Existen huecos de tipo (\aleph_1, \aleph_1) .*

DEMOSTRACIÓN: Si $A, B \subset \omega$ cumplen que $A \cap B$ es finito, podemos definir

$$p(A, B) = \min\{k \in \omega \mid (A \setminus k) \cap B = \emptyset\}.$$

Así, si $A \cap B = \emptyset$ se cumple que $p(A, B) = 0$, y si $\max(A \cap B) = k$ entonces $p(A, B) = k + 1$. Convenimos en que $p(A, B) = \infty$ si $A \cap B$ es infinito.

Si $A \subset \omega$ y F es una familia de subconjuntos de ω , escribiremos $A \approx F$ para indicar que, para todo $k \in \omega$, el conjunto

$$\{B \in F \mid p(A, B) < k\}$$

es finito. Observemos que si $A \approx F$ y $A \subset^* A'$, entonces $A' \approx F$.

En efecto, sea $n \in \omega$ tal que $A \setminus n \subset A'$. Para cada $B \in F$, se cumple que $p(A, B) \leq p(A', B)$, salvo a lo sumo si $p(A, B) < n + 1$, pues esto equivale a que $\max(A \cap B) \leq n$ y en caso contrario $\max(A \cap B) \in A'$, luego se cumple que $\max(A \cap B) \leq \max(A' \cap B)$. Ahora bien, sabemos que

$$F_0 = \{B \in F \mid p(A, B) < n + 1\}$$

es finito, luego

$$\{B \in F \mid p(A', B) < k\} \subset \{B \in F \mid p(A, B) < k\} \cup F_0$$

es finito, luego $A' \approx F$.

Vamos a definir inductivamente dos sucesiones $\{A_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ y $\{B_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$, estrictamente crecientes respecto de \subset^* , tales que $A_\alpha \cap B_\alpha = \emptyset$ y de modo que

$$(*) \quad A_\alpha \approx \{B_\delta \mid \delta < \alpha\}.$$

Admitamos de momento que tenemos estas sucesiones. Entonces es claro que

$$(\{A_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}, \{\omega \setminus B_\alpha\}_{\alpha < \omega_1})$$

es una sección en $\mathcal{P}\omega$. Vamos a ver que es un hueco. Para ello suponemos que un conjunto C lo separa, de modo que $A_\alpha \subset^* C$ y $C \cap B_\alpha$ es finito para todo $\alpha < \omega_1$.

Entonces $C \approx \{B_\delta \mid \delta < \alpha\}$ para todo α . Por otra parte, la función dada por $f(\alpha) = p(C, B_\alpha)$ sólo toma valores finitos, luego debe tomar un mismo

valor k sobre un conjunto no numerable de ordinales $Z \subset \omega_1$. Tomemos $\alpha < \omega_1$ suficientemente grande como para que $Z \cap \alpha$ sea infinito. Entonces

$$C \not\approx \{B_\delta \mid \delta < \alpha\},$$

pues k no cumple la definición de \approx , contradicción.

Pasamos a construir el par de sucesiones. Partimos de dos conjuntos disjuntos infinitos A_0 y B_0 tales que $\omega \setminus (A_0 \cup B_0)$ sea infinito. Supongamos construidas $\{A_\alpha\}_{\alpha < \beta}$ y $\{B_\alpha\}_{\alpha < \beta}$ que cumplan lo requerido y además $\omega \setminus (A_\alpha \cup B_\alpha)$ sea infinito, para todo $\alpha < \beta$. Si $\beta = \gamma + 1$, precisamente porque $\omega \setminus (A_\gamma \cup B_\gamma)$ es infinito, podemos tomar conjuntos disjuntos A_β y B_β que contengan estrictamente a A_γ y B_γ respectivamente y $\omega \setminus (A_\beta \cup B_\beta)$ siga siendo infinito. Entonces la propiedad (*) se cumple también para β , pues sigue siendo cierto que

$$A_\gamma \approx \{B_\delta \mid \delta < \beta\}$$

(ya que sólo hemos añadido un conjunto a la familia) y $A_\gamma \subset A_\beta$, luego también $A_\beta \approx \{B_\delta \mid \delta < \beta\}$.

Supongamos ahora que tenemos $\{A_\alpha\}_{\alpha < \lambda}$ y $\{B_\alpha\}_{\alpha < \lambda}$, siempre con la condición adicional de que la sucesión decreciente $\{\omega \setminus (A_\alpha \cup B_\alpha)\}_{\alpha < \lambda}$ esté formada por conjuntos infinitos. Como es numerable, no puede ser una torre, luego existe un $H \subset \omega$ infinito tal que $H \subset^* \omega \setminus (A_\alpha \cup B_\alpha)$ para todo $\alpha < \lambda$. Sea $E = \omega \setminus H$. Entonces $\omega \setminus E = H$ es infinito y $A_\alpha, B_\alpha \subset^* E$ para todo $\alpha < \lambda$.

Por otra parte, $(\{A_\alpha\}_{\alpha < \lambda}, \{\omega \setminus B_\alpha\}_{\alpha < \lambda})$ es una sección en $\mathcal{P}\omega$, y hemos visto que si fuera un hueco, entonces habría un hueco de tipo (\aleph_0, \aleph_0) , pero también hemos visto que no los hay, luego existe un $C \subset \omega$ que la separa. Esto significa que $A_\alpha \subset^* C$ y $C \cap B_\alpha$ es finito. Cambiando C por $C \cap E$ podemos suponer que $C \subset E$.

Como (*) se cumple para todo $\alpha < \lambda$, también tenemos que

$$C \approx \{B_\delta \mid \delta < \alpha\}.$$

No obstante, esto no implica necesariamente que $C \approx \{B_\delta \mid \delta < \lambda\}$. Consideremos los conjuntos

$$W_k = \{\delta < \lambda \mid p(C, B_\delta) < k\}.$$

Vamos a definir una sucesión $C = C_0 \subset C_1 \subset \dots$ de modo que $C_n \subset E$, $C_n \cap B_\alpha$ sea finito, para todo $n \in \omega$ y todo $\alpha < \lambda$ y

$$C_{n+1} \approx \{B_\delta \mid \delta \in W_n\}.$$

Supuesto definido C_n , si W_n es finito tomamos $C_{n+1} = C_n$. Si es infinito, sabemos que $W_n \cap \alpha$ es finito para todo $\alpha < \lambda$, luego W_n es cofinal en λ y su ordinal es ω . Digamos que $W_n = \{\delta_i \mid i < \omega\}$, donde la sucesión $\{\delta_i\}$ es cofinal creciente en λ .

Los conjuntos

$$Z_i = B_{\delta_i} \setminus (B_{\delta_0} \cup \dots \cup B_{\delta_{i-1}})$$

cumplen que $Z_i \cap E$ es infinito (porque suponemos que los B_α forman una sucesión estrictamente creciente, es decir, que cada uno contiene infinitos elementos más que los anteriores). Esto nos permite construir una sucesión $\{j_n\}_{n \in \omega}$ tal que $\bigwedge i \in \omega (i < j_i \wedge j_i \in Z_i \cap E)$. Llamamos $D = \{j_i \mid n \in \omega\}$ y definimos $C_{n+1} = C_n \cup D \subset E$.

Obviamente $D \cap B_{\delta_i}$ es finito para todo i , luego $D \cap B_\alpha$ es finito para todo $\alpha < \lambda$, luego lo mismo vale para $C_{n+1} \cap B_\alpha$. También es obvio que

$$D \approx \{B_{\delta_i} \mid i < \omega\} = \{B_\delta \mid \delta \in W_n\},$$

pues $p(D \cap B_{\delta_i}) = j_i + 1$. Por lo tanto $C_{n+1} \approx \{B_\delta \mid \delta \in W_n\}$. Esto termina la construcción de los C_n .

Como $(\{C_n\}_{n \in \omega}, \{\omega \setminus B_\alpha\}_{\alpha < \lambda})$ no puede ser un hueco, existe un $A \subset \omega$ tal que $C_n \subset^* A$ para todo n y $A \cap B_\alpha$ es finito para todo $\alpha < \lambda$. Cambiando A por $A \cap E$ podemos suponer que $A \subset E$. Más aún, añadiendo a A un número finito de elementos podemos suponer que $C = C_0 \subset A$. Veamos que

$$A \approx \{B_\alpha \mid \alpha < \lambda\}.$$

En efecto, supongamos que existe un k tal que el conjunto

$$W = \{\alpha < \lambda \mid p(A, B_\alpha) < k\}$$

es infinito. Como $C \subset A$, tenemos que $W \subset W_k$, luego también es infinito el conjunto $\{\alpha \in W_k \mid p(A, B_\alpha) < k\}$, pero entonces $A \not\approx \{B_\alpha \mid \alpha \in W_k\}$, pero esto es imposible, porque

$$C_{k+1} \approx \{B_\alpha \mid \alpha \in W_k\} \wedge C_{k+1} \subset^* A.$$

Por consiguiente, podemos definir $A_\lambda = A$ y $B_\lambda = E \setminus A$, con lo que se cumple (*), $A_\lambda \cap B_\lambda = \emptyset$, y $\omega \setminus (A_\lambda \cup B_\lambda) = \omega \setminus E$ es infinito. ■

Aquí termina todo lo que puede probarse en ZFC sobre existencia de huecos. En realidad se pueden probar resultados como el siguiente, que, no obstante, no aseguran en general la existencia de ningún tipo que hueco que no hayamos considerado ya:

Teorema 9.27 *Si $\kappa < \mathfrak{b}$ es un cardinal regular no numerable, entonces existe otro cardinal regular no numerable μ tal que hay un hueco de tipo (κ, μ) .*

DEMOSTRACIÓN: Vamos a construir recurrentemente una sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ en ${}^\omega\omega$. Elegimos f_0 que sea estrictamente creciente y, dada $\{f_\alpha\}_{\alpha < \beta}$, como la sucesión no puede ser no acotada, elegimos $f \in {}^\omega\omega$ tal que $f_\alpha \leq^* f$ para todo α y definimos

$$f_\beta(n) = \max\{f(m) \mid m \leq n\} + 1.$$

Así f_β es estrictamente creciente y para cada α existe un n tal que

$$f_\alpha|_{\omega \setminus n} < f_{\alpha+1}|_{\omega \setminus n}$$

Ahora construimos $\{g_\beta\}_{\beta < \mathfrak{c}^+}$. Partimos de una función g_0 tal que $f_\alpha \leq^* g_0$ para todo α , que existe porque $\kappa < \mathfrak{b}$. Si tenemos definidas $\{g_\beta\}_{\beta < \gamma}$, elegimos g_γ de modo que $f_\alpha \leq^* g_\gamma \leq^* g_\beta \wedge g_\gamma \neq^* g_\beta$ para todo $\alpha < \kappa$ y todo $\beta < \gamma$ si existe tal g_γ , y $g_\beta = 0$ en caso contrario.

Obviamente tiene que haber un β tal que $g_\beta = 0$, pues no hay \mathfrak{c}^+ funciones en ω^ω . Sea $\lambda = \sup\{\beta < \mathfrak{c}^+ \mid g_\beta \neq 0\}$. Vamos a probar que λ es un ordinal límite, con lo que $(\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{g_\beta\}_{\beta < \lambda})$ será un agujero en ω^ω .

Dado β tal que $g_\beta \neq 0$, sea $g(n) = g_\beta(n) - 1$ (entendiendo que $0 - 1 = 0$). De hecho, como $f_0 \leq^* g_\beta$ y f_0 es estrictamente creciente, a lo sumo toma una vez el valor 0, luego g_β toma el valor 0 un número finito de veces, luego $g \leq^* g_\beta$ y $g \neq^* g_\beta$. Dado $\alpha < \kappa$, sea n tal que $f_\alpha|_{\omega \setminus n} < f_{\alpha+1}|_{\omega \setminus n}$. Entonces

$$f_\alpha \leq^* f_{\alpha+1} - 1 \leq^* g_\beta - 1 = g$$

Por lo tanto g cumple los requisitos para que se cumpla $g_{\beta+1} \neq 0$. Esto implica claramente que λ es un ordinal límite. Sea $\mu = \text{cf } \lambda$ y sea $\{\beta_\delta\}_{\delta < \mu}$ una sucesión cofinal creciente en λ . Entonces $(\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{g_{\beta_\delta}\}_{\delta < \mu})$ es un hueco, donde μ es un cardinal regular que, por 9.25 no puede ser numerable. ■

Ahora vamos a probar que es consistente que existan huecos de cualquier tipo salvo (\aleph_0, \aleph_0) . Construiremos los modelos correspondientes a partir de un teorema general:

Teorema 9.28 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y sea $X \in M$ un conjunto parcialmente ordenado. Entonces existe un c.p.o. $\mathbb{P} \in M$ que cumple la c.c.n. y $|\mathbb{P}| = |X|$, tal que si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces en $M[G]$ existe una semejanza de X en un subconjunto³ de $\mathcal{P}\omega/\text{fin}$.*

DEMOSTRACIÓN: Razonando en M , definimos \mathbb{P} como el conjunto de todas las funciones $p : d \times l \rightarrow 2$, donde $d \subset X$ es finito y $l \in \omega$. Dada una condición $p \in \mathbb{P}$, representaremos su dominio por $d_p \times l_p$. Consideramos en \mathbb{P} el orden dado por

$$p \leq q \leftrightarrow q \subset p \wedge \bigwedge i \in \omega \bigwedge xy \in d_p (l_q \leq i < l_p \wedge x \leq y \rightarrow p(x, i) \leq p(y, i)).$$

Obviamente $\mathbb{1} = \emptyset$ es el máximo en \mathbb{P} .

Veamos que \mathbb{P} cumple la c.c.n. Sea $E \subset \mathbb{P}$ no numerable. Tomando un subconjunto podemos suponer que $\{l_p\}_{p \in E}$ es constante igual a $l \in \omega$. Por el lema de los sistemas Δ podemos reducir E aún más para exigir que $\{d_p\}_{p \in E}$ sea constante o cuasidisjunta de raíz $r \subset X$. Más aún, podemos suponer que las restricciones de las condiciones de E a $r \times l$ sean todas iguales, pero entonces dos condiciones cualesquiera de E son compatibles, pues se extienden a su unión.

³Si se añade la hipótesis de que todo conjunto numerable en X tenga una cota superior estricta, puede exigirse que la imagen de la semejanza sea cofinal en $\mathcal{P}\omega/\text{fin}$, aunque la prueba, debida a Hechler, es bastante más compleja.

Fijemos ahora un filtro genérico G , de modo que la extensión $M[G]$ tiene los mismos cardinales y cofinalidades que M . Para cada $x \in X$ definimos

$$A_x = \{i \in \omega \mid \forall p \in G \ p(x, i) = 1\}.$$

Así la aplicación $F : X \longrightarrow (\mathcal{P}\omega/\text{fin})^{M[G]}$ dada por $F(x) = [A_x]$ cumple obviamente $F \in M[G]$. Vamos a probar que es una semejanza en su imagen.

En primer lugar, los conjuntos A_x son todos infinitos, pues los conjuntos

$$D_x^n = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall i \in \omega (n \leq i \wedge p(x, i) = 1)\} \in M$$

son densos en \mathbb{P} . En efecto, si $q \in \mathbb{P}$, llamamos $i = \max\{l_q, n\}$ y definimos p sobre $d_p \times (i + 1)$ mediante

$$p(y, j) = \begin{cases} q(y, j) & \text{si } (y, j) \in d_q \times l_q, \\ 1 & \text{si } j = i \wedge x \leq y, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Es claro que $p \in D_x^n$ y $p \leq q$, luego D_x^n es denso.

También es denso el conjunto $E_{x,y} = \{p \in \mathbb{P} \mid x, y \in d_p\}$. En efecto, dada $q \in \mathbb{P}$, basta definir p sobre $(d_q \cup \{x, y\}) \times l_q$ asignando valores cualesquiera a los pares que no estaban en el dominio de q .

Ahora, si $x < y$ y tomamos $q \in D_{x,y} \cap G$, se cumple que $A_x \setminus l_q \subset A_y$, pues si $i \in A_x$ cumple $i \geq l_q$, entonces $p(x, i) = 1$ para cierto $p \in G$, que podemos tomar $p \leq q$. Por lo tanto $p(y, i) = 1$, luego $i \in A_y$.

Esto prueba que si $x < y$ entonces $F(x) \leq F(y)$, pero queremos probar que $F(x) < F(y)$. Para ello basta observar que, para $x < y$, los conjuntos siguientes son densos:

$$F_{x,y}^n = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall i \in \omega (n \leq i \wedge p(x, i) = 0 \wedge p(y, i) = 1)\}.$$

Dado $q \in \mathbb{P}$, basta tomar $i = \max\{l_q, n\}$ y definir p sobre $d_q \times (i + 1)$ mediante

$$p(z, j) = \begin{cases} q(z, j) & \text{si } (z, j) \in d_q \times l_q, \\ 1 & \text{si } j = i \wedge y \leq z, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

La densidad de estos conjuntos se traduce en que $A_y \setminus A_x$ es infinito, luego ciertamente $F(x) < F(y)$. Como el orden de X no es necesariamente total, para asegurar que F es una semejanza en su imagen hace falta probar que si x e y son incomparables entonces $F(x)$ y $F(y)$ también lo son.

Para ello basta probar la densidad de los conjuntos siguientes:

$$H_n = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall i \in \omega (n \leq i \wedge p(x, i) = 0 \wedge p(y, i) = 1)\}.$$

Esto implica que $A_y \setminus A_x$ es infinito, pero por simetría también $A_x \setminus A_y$ es infinito y concluimos que $F(x)$ y $F(y)$ no son comparables. Para probar que en efecto

son densos, tomamos $q \in \mathbb{P}$. Podemos suponer que $x, y \in d_q$, pues ya hemos visto que podemos extender q hasta una condición que cumpla esto. Llamamos $i = \max\{l_q, n\}$ y definimos p sobre $d_q \times (i+1)$ mediante

$$p(z, j) = \begin{cases} q(z, j) & \text{si } (z, j) \in d_q \times l_q, \\ 1 & \text{si } j = i \wedge y \leq z, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

claramente $p \leq q$ y esto termina la prueba. \blacksquare

Con esto ya podemos probar un teorema general sobre modelos con huecos:

Teorema 9.29 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y en M consideremos dos cardinales $\kappa, \mu \leq \mathfrak{c}$ y $\text{cf } \kappa > \aleph_0$. Entonces existe una extensión genérica de M con los mismos cardinales, cofinalidades y el mismo valor de \mathfrak{c} en la cual hay un hueco de tipo (κ, μ) .*

DEMOSTRACIÓN: Consideramos en M el conjunto $X = \kappa + \mu$ (suma ordinal) con el orden que restringido a κ es el orden usual en κ y que restringido a $X \setminus \kappa$ es el inverso del usual, es decir:

$$0 < 1 < 2 < \dots < \kappa + 2 < \kappa + 1 < \kappa.$$

Sea \mathbb{P} el c.p.o. dado por el teorema anterior, que cumple la c.c.n. y tiene cardinal $\kappa\mu$. Sea G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces los cardinales y cofinalidades en $M[G]$ son iguales que en M y, como en M se cumple que $\kappa^{\aleph_0} = \mu^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$, es fácil comprobar que $\mathfrak{c}^{M[G]} = \mathfrak{c}^M$.

Además en $M[G]$ existe una semejanza entre X y un subconjunto de $\mathcal{P}\omega$, lo que nos da una sección $(\{A_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{B_\beta\}_{\beta < \mu})$ de tipo (κ, μ) . Vamos a ver que es un agujero.

En caso contrario existe un $C \subset \omega$ que la separa, que será de la forma $C = \sigma_G$, donde σ es un buen nombre para un subconjunto de ω . Como las anticadenas de \mathbb{P} son numerables y $\text{cf } \kappa > \aleph_0$, existe un $\gamma < \mu$ tal que $\sigma \in M^{\mathbb{P}_\gamma}$, donde, con la notación de la prueba del teorema anterior,

$$\mathbb{P}_\gamma = \{p \in \mathbb{P} \mid d(p) \cap \kappa \subset \gamma\}.$$

Es inmediato comprobar que la inclusión $i : \mathbb{P}_\gamma \longrightarrow \mathbb{P}$ es una inmersión completa, pues una reducción de una condición $p \in \mathbb{P}$ a \mathbb{P}_γ es simplemente $p|_\gamma = \{(\alpha, i) \in p \mid \alpha < \gamma \vee \kappa \leq \alpha\}$. Más aún, la aplicación $R : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{P}_\gamma$ dada por $R(p) = p|_\gamma$ es una restricción en el sentido de 8.16.

Por lo tanto, según 8.19, tenemos que $G_\gamma = i^{-1}[G]$ es un filtro \mathbb{P}_γ -genérico sobre M y $M[G] = M[G_\gamma][G]$, donde en el miembro derecho consideramos a G como filtro \mathbb{P}/G_γ -genérico sobre $M[G_\gamma]$. La elección de γ hace que $C \in M[G_\gamma]$.

Ahora basta probar que los conjuntos siguientes son densos en \mathbb{P}/G_γ :

$$E_n = \{p \in \mathbb{P}/G_\gamma \mid \forall i \in \omega \setminus C (n \leq i \wedge p(\gamma, i) = 1)\} \in M[G_\gamma],$$

pues entonces $A_\gamma \setminus C$ es infinito y tenemos una contradicción.

Dada una condición $q \in \mathbb{P}/G_\gamma$, podemos tomar un $i \in \omega \setminus C$ tal que $i \geq n$, $i \geq l_q$, pues $\omega \setminus C$ es infinito, y podemos extender q a otra condición p cuyo dominio sea $(d_q \cup \{\gamma\}) \times (i+1)$, mediante

$$p(\alpha, j) = \begin{cases} q(\alpha, j) & \text{si } \alpha \in d_q \wedge j < l_q, \\ 1 & \text{si } \alpha < \gamma \wedge j \in A_\alpha, \\ 1 & \text{si } \alpha \geq \kappa \wedge j \in B_\alpha, \\ 1 & \text{si } \gamma \leq \alpha < \kappa \wedge j \geq l_q, \\ 1 & \text{si } \alpha = \gamma \notin d_q, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Los tres primeros casos (y el último) garantizan que $p|_\gamma \in G$. Por lo tanto, $p \in \mathbb{P}/G_\gamma$, y claramente $p \leq q$ y $p \in E_n$. ■

Así pues, es consistente que, por ejemplo, $\mathfrak{c} = \aleph_5$ y que haya un hueco de tipo (\aleph_5, \aleph_5) , o (\aleph_2, \aleph_3) , o cualquier variante distinta de (\aleph_0, \aleph_0) (o dos cardinales de cofinalidad numerable, pues de hueco de ese tipo se podría obtener otro de tipo (\aleph_0, \aleph_0)). Observemos que la prueba del teorema anterior se puede adaptar ligeramente para probar la consistencia de que existan simultáneamente huecos de varios tipos. Basta tomar un conjunto X que sea unión disjunta de varios conjuntos del tipo que hemos empleado en la prueba.

Nota Una versión simplificada del teorema anterior prueba que es consistente que haya torres de distintas longitudes (de cofinalidad no numerable). Sólo hay que tomar un X formado únicamente por una sucesión, en lugar de un par de sucesiones opuestas. ■

Con lo visto hasta ahora queda abierta la posibilidad de que la existencia de huecos de ciertos tipos no sólo sea consistente con ZFC, sino que sea demostrable, como sucede con los de tipo (\aleph_1, \aleph_1) . El axioma de Martin implica que en casi todos los casos la respuesta es negativa:

Teorema 9.30 (AM+ $\mathfrak{c} > \aleph_1$) *Si existe un hueco de tipo (κ, μ) , donde κ y μ son cardinales regulares no numerables, entonces $\kappa = \mu = \aleph_1$ o bien $\kappa = \mathfrak{c}$ o bien $\mu = \mathfrak{c}$.*

DEMOSTRACIÓN: Consideremos una sección $(\{A_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{B_\beta\}_{\beta < \mu})$ en $\mathcal{P}\omega$ en las condiciones del enunciado, y vamos a ver que no es un hueco salvo a lo sumo en los casos indicados. Para ello definimos un c.p.o. \mathbb{P} cuyos elementos son ternas $p = (u_p, x_p, w_p)$ de modo que $u_p \subset \kappa$, $w_p \subset \mu$ son conjuntos finitos y $x_p \in 2^{<\omega}$ es una sucesión de dominio $l_p \in \omega$, de modo que

$$\bigcup_{\alpha \in u_p} A_\alpha \cap \bigcup_{\beta \in w_p} (\omega \setminus B_\beta) \subset l_p.$$

Consideramos en \mathbb{P} el orden dado por $q \leq p$ si y sólo si $u_p \subset u_q$, $w_p \subset w_q$, $x_p \subset x_q$ y para todo $i \in \omega$ tal que $l_p \leq i < l_q$, se cumple

$$i \in \bigcup_{\alpha \in u_p} A_\alpha \rightarrow x_q(i) = 1, \quad i \in \bigcup_{\beta \in w_p} (\omega \setminus B_\beta) \rightarrow x_q(i) = 0.$$

Notemos que no pueden darse los dos casos, ya que entonces $i \in l_p$.

Veamos que si existe un conjunto C que separa la sección, entonces, \mathbb{P} cumple la c.c.n. Tenemos que para cada $q \in \mathbb{P}$ existe un $k_q \in \omega$ tal que

$$\bigcup_{\alpha \in u_q} A_\alpha \setminus k_q \subset C \setminus k_q \subset \bigcap_{\beta \in w_q} B_\beta.$$

El conjunto $\mathbb{P}^* = \{q \in \mathbb{P} \mid k_q \leq l_q\}$ es denso en \mathbb{P} , pues la sucesión x_q siempre se puede extender arbitrariamente sin tocar las otras dos componentes de q . Basta probar que \mathbb{P}^* cumple la c.c.n. Ahora bien, si $E \subset \mathbb{P}^*$ es no numerable, tiene que haber una cantidad no numerable de condiciones $p \in E$ para las que k_q sea el mismo y, de entre ellas, tiene que haber a su vez una cantidad no numerable para las que x_q sea el mismo.

Ahora basta observar que si $p, q \in \mathbb{P}^*$ cumplen $x_p = x_q = x$ y $k_p = k_q = k$, entonces son compatibles, pues una extensión común es $(u_p \cup u_q, x, w_p \cup w_q)$. En efecto, sólo hay que tener en cuenta que si

$$i \in \bigcup_{\alpha \in u_p \cup u_q} A_\alpha \cap \bigcup_{\beta \in w_p \cup w_q} (\omega \setminus B_\beta),$$

entonces $i \in A_\alpha$, para cierto $\alpha \in u_p \cup u_q$, pero entonces tiene que ser $i < k$, pues en caso contrario $i \in A_\alpha \setminus k \subset C \setminus k \subset \bigcap_{\beta \in w_p \cup w_q} B_\beta$, y tenemos una contradicción. Luego $i < k < l$.

Notemos que el razonamiento anterior vale para secciones cualesquiera, aunque sus longitudes no sean cardinales ni cumplan las hipótesis del enunciado.

Ahora probamos que si $\kappa > \aleph_1$, entonces \mathbb{P} cumple la c.c.n. Para ello tomamos $E \subset \mathbb{P}$ tal que $|E| = \aleph_1$. Elegimos $\gamma < \kappa$ tal que $\bigcup_{q \in E} u_q \subset \gamma$ (suponemos que κ es regular, de acuerdo con el enunciado).

Sea \mathbb{P}_γ el c.p.o. correspondiente a la sección $(\{A_\alpha\}_{\alpha < \gamma}, \{B_\beta\}_{\beta < \mu})$. Entonces $E \subset \mathbb{P}_\gamma$, pero \mathbb{P}_γ cumple la c.c.n., por lo que acabamos de probar, ya que A_γ separa la sección. Esto implica que en E hay dos condiciones compatibles en \mathbb{P}_γ , que seguirán siéndolo en \mathbb{P} , luego \mathbb{P} no tiene anticadenas no numerables. Un razonamiento similar se aplica si $\mu > \aleph_1$.

Por lo tanto podemos aplicar AM. Consideramos los conjuntos densos

$$D_i = \{p \in \mathbb{P} \mid i < l_p\},$$

$$E_{\alpha, \beta} = \{q \in \mathbb{P} \mid \alpha \in u_q \wedge \beta \in w_q\}.$$

Suponiendo que $\kappa, \mu < \mathfrak{c}$, el axioma de Martin nos da un filtro G que los corta a todos. Entonces el conjunto

$$C = \{i \in \omega \mid \bigvee p \in G (i \in l_p \wedge x_p(i) = 1)\}$$

separa la sección. En efecto, dados $\alpha < \kappa$ y $\beta < \mu$, usando $E_{\alpha, \beta}$ obtenemos una condición $q \in \mathbb{P}$ tal que $\alpha \in u_q, \beta \in w_q$. Si $i \in A_\alpha \setminus l_q$, usando D_n obtenemos una condición $p \in \mathbb{P}$, y podemos suponer $p \leq q$, tal que $i \in l_p$, con lo que $x_p(i) = 1$, por la definición del orden en \mathbb{P} , luego $i \in C$, y así $A_\alpha \subset^* C$.

Por otra parte, si $i \in C \setminus l_q$ entonces existe $p \in G$, y podemos suponer $p \leq q$, tal que $x_p(i) = 1$, luego $i \in \bigcap_{\beta \in w_q} B_\beta$, en particular $i \in B_\beta$, para el β prefijado. Por lo tanto $C \subset^* B_\beta$. ■

Teniendo en cuenta que AM implica $\mathfrak{b} = \mathfrak{c}$, tenemos que bajo AM (salvo simetría) existen a lo sumo huecos de tipo (\mathfrak{c}, κ) y (\aleph_1, \aleph_1) . (Notemos que no hace falta exigir $\mathfrak{c} > \aleph_1$ aunque forme parte de las hipótesis del teorema anterior, pues bajo HC el resultado es cierto trivialmente.) Por otro lado:

Teorema 9.31 (AM) *Si $\aleph_1 < \kappa < \mathfrak{c}$, existen huecos de tipo (\mathfrak{c}, κ) .*

DEMOSTRACIÓN: Es una consecuencia trivial del teorema anterior y de 9.27, pues, como $\kappa < \mathfrak{c} = \mathfrak{b}$, tiene que haber un hueco de tipo (κ, μ) y por el teorema anterior tiene que ser $\mu = \mathfrak{c}$. ■

En resumen, bajo AM sabemos que existen huecos de tipo (\aleph_1, \aleph_1) , de tipo (\mathfrak{c}, \aleph_0) y de tipo (\mathfrak{c}, κ) para todo $\aleph_1 < \kappa < \mathfrak{c}$, y que no existen de ningún otro tipo salvo a lo sumo de tipo (\mathfrak{c}, \aleph_1) y $(\mathfrak{c}, \mathfrak{c})$.

El teorema siguiente implica que la existencia de huecos de estos dos tipos es consistente con AM:

Teorema 9.32 *En el modelo de AM construido en 8.38, todos los huecos de tipo (κ, μ) , con $\mu \leq \kappa$, del modelo base siguen siendo huecos (de tipo (\mathfrak{c}, μ)) en la extensión genérica.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $(\{A_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{B_\beta\}_{\beta < \mu})$ un hueco en M . Claramente sigue siendo una sección en la extensión genérica $M[G]$. Tenemos que probar que no hay ningún conjunto $S \in M[G]$ que la separe. En caso contrario, sea $S = \sigma_G$, donde σ es un buen nombre para un subconjunto de ω . Como las anticadenas de \mathbb{P}_κ son numerables, existe un $\gamma < \kappa$ tal que $\sigma \in M^{\mathbb{P}_\gamma}$, con lo que $S \in M[G_\gamma]$.

En $M[G_\gamma]$ podemos encontrar números naturales n_α tales que $A_\alpha \setminus n_\alpha \subset S$. Como κ no es numerable en $M[G_\gamma]$, existe un conjunto $X \subset \kappa$ en $M[G_\gamma]$ de cardinal κ , y un $n \in \omega$ de modo que $\bigwedge \alpha \in X \ n_\alpha = n$.

Sea $X = \tau_{G_\gamma}$ y, para cada $p \in \mathbb{P}_\gamma$, sea $X_p = \{\alpha \in \kappa \mid p \Vdash \check{\alpha} \in \tau\}$. Entonces, en $M[G_\gamma]$,

$$X = \bigcup_{p \in G_\gamma} X_p.$$

En realidad podemos considerar $G_\gamma \cap \bar{\mathbb{P}}_\gamma$, donde $\bar{\mathbb{P}}_\gamma$ es el conjunto denso construido en la prueba de 8.38, y así su cardinal es $< \kappa$, por lo que existe un $p \in G_\gamma$ tal que $|X_p| = \kappa$. Como $X_p \in M$, también $A = \bigcup_{\alpha \in X_p} A_\alpha \in M$, y $A \setminus n \subset S$.

Ahora bien, X_p es cofinal en κ , luego para todo $\alpha < \kappa$ existe $\alpha \leq \alpha' \in X_p$, luego $A_\alpha \subset^* A_{\alpha'} \subset A \subset^* S \subset^* X_\beta$, para todo $\beta < \mu$, luego A separa el hueco dado en M , contradicción. ■

Así pues, podemos construir una extensión genérica de L que cumpla, por ejemplo,

$$2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_1} = 2^{\aleph_2} = 2^{\aleph_3} = \aleph_4 = \kappa.$$

A su vez formamos una extensión genérica según el teorema 9.29 en la que igualmente $\mathfrak{c} = \aleph_4$ y además haya huecos de tipo $(\mathfrak{c}, \mathfrak{c})$, o (\mathfrak{c}, \aleph_1) , o de ambos a la vez, y por último el teorema anterior nos da un modelo con los mismos huecos y el mismo valor de \mathfrak{c} , en el que además se cumple AM.

No obstante, la existencia de huecos de estos dos tipos no es demostrable ni siquiera con AM. En la sección siguiente presentamos otro axioma que, entre otras cosas, implica que no existen.

9.4 El axioma de las coloraciones abiertas

Vamos a probar la consistencia de un axioma introducido por Stevo Todorcević en relación con ciertos problemas topológicos. Para introducirlo necesitamos algunos conceptos:

Definición 9.33 Si X es un conjunto, podemos considerar la diagonal

$$\Delta_X = \{(x, y) \in X \times X \mid x = y\},$$

y su complementario $D(X) = (X \times X) \setminus \Delta_X$. Un conjunto $S \subset D(X)$ es *simétrico* si y sólo si $S = \{(x, y) \mid (y, x) \in S\}$. Es claro que existe una biyección natural entre los subconjuntos de $[X]^2$ y los subconjuntos simétricos de $D(X)$. Concretamente, cada $C \subset [X]^2$ se corresponde con $C^* = \{(x, y) \mid \{x, y\} \in C\}$.

Una *coloración* de un conjunto X es un conjunto $C \subset [X]^2$. Un conjunto $H \subset X$ es *homogéneo* respecto a la coloración C si $[H]^2 \subset C$ (y entonces diremos que está *totalmente coloreado*) o bien $[H]^2 \subset [X]^2 \setminus C$ (y entonces diremos que está *totalmente no coloreado*).⁴ Notemos que los subconjuntos de cardinal 1 son trivialmente totalmente coloreados y totalmente no coloreados.

Si X es un espacio topológico, una *coloración abierta* de X es una coloración que, como subconjunto de $D(X)$, es abierta en $X \times X$, respecto de la topología producto.

El *espacio de Baire* es $\mathcal{N} = {}^\omega\omega$ con la topología producto que resulta de considerar en ω la topología discreta. Una base está formada por los conjuntos $B_s = \{x \in \mathcal{N} \mid x|_n = s\}$, donde $s \in {}^\omega\omega^{<\omega}$ y $n = \mathcal{D}s$.

⁴El lector puede imaginarse un grafo infinito cuyos vértices son todos los puntos del conjunto X en el que los vértices correspondientes a elementos de C han sido unidos por una arista. Así, un subconjunto de X es homogéneo si todos sus vértices están conectados por aristas o ninguno lo está. El término “coloreado” proviene de la generalización de este tipo de conceptos a coloraciones determinadas por aplicaciones $[X]^2 \rightarrow n$ con $n > 2$, donde hay que pensar que todos los pares de vértices están conectados por una arista, a la cual se le ha asignado un color $i < n$, de modo que un conjunto es homogéneo si todos sus vértices están unidos por aristas del mismo color. No obstante, y a pesar del nombre del axioma que vamos a estudiar, no necesitamos tratar con coloraciones en este sentido general, sino que sólo necesitaremos considerar aristas de dos colores, lo cual equivale a distinguir entre la presencia o ausencia una arista que une dos vértices dados.

Axioma de las coloraciones abiertas (ACA) *Si $X \subset \mathbb{N}$ y C es una coloración abierta en X , o bien X tiene un subconjunto totalmente coloreado no numerable, o bien X es unión de una cantidad numerable de conjuntos totalmente no coloreados.*

Puede probarse que es equivalente exigir ACA para subespacios del espacio de Baire o exigirlo para cualquier espacio métrico separable. En la sección siguiente mostraremos algunas consecuencias de este axioma, mientras que en ésta nos ocupamos de probar su consistencia y algunos hechos relacionados. En realidad vamos a demostrar la consistencia de ACA para cualquier espacio de Hausdorff con una base numerable. Más aún, vamos a probar la consistencia de MA + ACA.

Empezamos con un hecho elemental que usaremos en varias ocasiones:

Teorema 9.34 *Sea X un espacio de Hausdorff y C una coloración abierta de X . Si $H \subset X$ está totalmente no coloreado, entonces lo mismo vale para \overline{H} .*

DEMOSTRACIÓN: En caso contrario existen $x, y \in \overline{H}$ tales que $x \neq y$ y $\{x, y\} \in C$. Como C^* es abierto, existen abiertos disjuntos U, V en X tales que $x \in U, y \in V$ y $U \times V \subset C^*$. Podemos tomar puntos $x' \in U \cap H, y' \in V \cap H$. En particular $x' \neq y'$, y se cumple que $(x', y') \in C^*$, luego $\{x', y'\} \subset C$, contradicción. ■

En particular, es equivalente decir que X es unión de una cantidad numerable de conjuntos totalmente no coloreados que decir que es unión de una cantidad numerable de cerrados totalmente no coloreados.

El teorema siguiente nos da los c.p.o.s que iteraremos para probar la consistencia de ACA:

Teorema 9.35 *Supongamos que 2^{\aleph_0} es un cardinal regular. Sea X un espacio de Hausdorff con una base numerable y C una coloración abierta de X tal que X no es unión de menos de 2^{\aleph_0} conjuntos totalmente no coloreados. Entonces:*

- a) *Existe un $Y \subset X$ tal que $|Y| = 2^{\aleph_0}$ y el conjunto*

$$\mathbb{Q} = \{q \in \mathcal{P}^f Y \mid q \text{ está totalmente coloreado}\},$$

considerado como c.p.o. con la inversa de la inclusión, cumple la condición de cadena 2^{\aleph_0} .

- b) *Podemos elegir Y de modo que \mathbb{Q} cumpla que para cada $s \in \mathbb{Q}$ existen 2^{\aleph_0} elementos $y \in Y$ tales que $s \cup \{y\} \in \mathbb{Q}$.*

DEMOSTRACIÓN: Fijemos una base numerable \mathcal{B} de X . Notemos que X tiene un subconjunto denso numerable, y que todo elemento de X es límite de una sucesión en dicho conjunto denso, lo que nos da que $|X| \leq 2^{\aleph_0}$, y como los conjuntos con un punto son totalmente no coloreados, la hipótesis del teorema implica que $|X| = 2^{\aleph_0}$.

Si $n \in \omega$, $p \in X^n$ y $U \subset X^n$ es un abierto tal que $p \in U$, definimos

$$U_p = \{q \in U \mid \bigwedge i < n (p_i \neq q_i \wedge \{p_i, q_i\} \in C)\}.$$

Si $A \subset X^n$, $f : A \rightarrow X$ y $p \in X^n$, definimos

$$\omega_f(p) = \bigcap \{\overline{f[U_p \cap A]} \mid U \subset X^n \text{ es abierto} \wedge p \in U\}.$$

Sea $\{f_\alpha\}_{\alpha < 2^{\aleph_0}}$ una enumeración de todas las funciones f en las condiciones anteriores para cualquier $n \geq 1$ y cualquier A numerable, y sea $\{T_\alpha\}_{\alpha < 2^{\aleph_0}}$ una enumeración de los subconjuntos cerrados de X totalmente no coloreados. Definimos por recurrencia una sucesión $\{x_\delta\}_{\delta < 2^{\aleph_0}}$ que cumpla las condiciones siguientes:

- a) $x_\delta \in X \setminus x[\delta]$,
- b) $x_\delta \notin T_\alpha$ para todo $\alpha < \delta$,
- c) Para cada $\alpha < \delta$, si $f_\alpha : A \subset X^n \rightarrow X$, $p \in x[\delta]^n$ y $\omega_{f_\alpha}(p)$ es totalmente no coloreado, entonces $x_\delta \notin \omega_{f_\alpha}(p)$.

Esto es posible porque la familia formada por todos los conjuntos $\{x_\alpha\}$, T_α y $\omega_{f_\alpha}(p)$ en las condiciones de c) tiene cardinal $< 2^{\aleph_0}$, luego por hipótesis su unión no es todo X . Definimos $Y = \{x_\delta \mid \delta < 2^{\aleph_0}\}$. Vamos a ver que cumple lo requerido en la parte a) del enunciado. Para ello basta probar que lo siguiente es cierto para todo n :

(*) Si $F \subset [Y]^n \cap \mathbb{Q}$ es una familia de 2^{\aleph_0} conjuntos disjuntos dos a dos, entonces existen $p, q \in F$ distintos tales que $p \cup q \in \mathbb{Q}$.

En efecto, si se cumple (*) y F es cualquier subconjunto de \mathbb{Q} de cardinal 2^{\aleph_0} , contiene una subfamilia del mismo cardinal formada por elementos de $[Y]^n \cap \mathbb{Q}$, y por el lema de los sistemas Δ podemos suponer que es cuasidisjunta de raíz r . Entonces podemos aplicar (*) a la familia $\{x \setminus r \mid x \in F\}$, lo que nos da $p, q \in F$ tales que $(p \setminus r) \cup (q \setminus r) \in \mathbb{Q}$, pero entonces es claro que $p \cup q \in \mathbb{Q}$, luego la familia inicial no es una anticadena.

Probamos (*) por inducción sobre n . Si $n = 1$ sea $Y' = \{y \in Y \mid \{y\} \in F\}$ y sea

$$Y'' = \{x \in Y' \mid \bigwedge y \in Y' \setminus \{x\} (\{x, y\} \in [X]^2 \setminus C)\}.$$

Obviamente Y'' es totalmente no coloreado, luego por el teorema anterior existe un α tal que $\overline{Y''} = T_\alpha$. Como $|Y'| = 2^{\aleph_0}$, existe un $\alpha < \beta < 2^{\aleph_0}$ tal que $x_\beta \in Y'$, pero entonces $x_\beta \notin Y''$ por b). Por lo tanto existe un $y \in Y' \setminus \{x_\beta\}$ tal que $\{x_\beta, y\} \in C$, luego $\{x_\beta\}, \{y\} \in F$ cumplen que $\{x_\beta, y\} \in \mathbb{Q}$, como había que probar.

Supongamos ahora que $n > 1$ y que (*) se cumple para todo natural menor. Cada elemento de F es de la forma $s[n]$, para cierta $s : n \rightarrow X$ que es única si exigimos además que $s(i) = x_{\alpha_i}$ con $\alpha_0 < \dots < \alpha_{n-1}$.

Para cada $s \in F$ y cada $i < j < n$, tenemos que $\{s(i), s(j)\} \in C$ y, como la coloración es abierta, existen abiertos $A_{i,j}^s, A_{j,i}^s$ tales que $s(i) \in A_{i,j}^s, s(j) \in A_{j,i}^s$ y $A_{i,j}^s \times A_{j,i}^s \subset C^*$. Tomamos entonces $B_i^s \in \mathcal{B}$ tal que $s(i) \in B_i^s \subset \bigcap_j A_{i,j}^s$, de modo que

$$B_i^s \times B_j^s \subset A_{i,j}^s \times A_{j,i}^s \subset C^*.$$

Como la base \mathcal{B} es numerable, podemos tomar un subconjunto de F de cardinal 2^{\aleph_0} para el que todos los B_0^s sean un mismo $B_0 \in \mathcal{B}$, en este subconjunto podemos tomar otro subconjunto del mismo cardinal para el que todos los B_1^s sean el mismo $B_1 \in \mathcal{B}$ y, dando n pasos, obtenemos abiertos básicos B_0, \dots, B_{n-1} (y un subconjunto de F al que podemos seguir llamando F) de manera que $\bigwedge s \in F \bigwedge i < n s(i) \in B_i$ y, para $i < j$, $B_i \times B_j \subset C^*$.

En particular, si $p, q \in F$ son distintos, tenemos asegurado que si $i < j < n$ entonces $\{p(i), q(j)\} \in C$, luego para que $p[n] \cup q[n]$ esté totalmente coloreado sólo falta garantizar que $\{p(i), q(i)\} \in C$ para todo $i < n$.

Sea $A = \{s|_{n-1} \mid s \in F\} \subset X^{n-1}$ y sea $g : A \rightarrow X$ la función dada por $g(s|_{n-1}) = s(n-1)$. Notemos que g está bien definida porque los conjuntos de F son disjuntos dos a dos. Definimos

$$F_0 = \{s \in F \mid s(n-1) \in \omega_g(s|_{n-1})\}.$$

Veamos que $|F \setminus F_0| < 2^{\aleph_0}$. En caso contrario, para cada $s \in F \setminus F_0$, puesto que $s(n-1) \notin \omega_g(s|_{n-1})$, existe un abierto básico $U^s \subset X^{n-1}$ de manera que $s|_{n-1} \in U$, pero $s(n-1) \notin \overline{g[U^s_{s|_{n-1}} \cap A]}$. Tomemos un abierto básico I^s tal que $s(n-1) \in I^s$ y $I^s \cap \overline{g[U^s_{s|_{n-1}} \cap A]} = \emptyset$.

Podemos tomar $F' \subset F \setminus F_0$ de cardinal 2^{\aleph_0} de modo que I^s y U^s sean los mismos I, U para todo $s \in F'$. Entonces $\{s|_{n-1} \mid s \in F'\}$ se corresponde con una familia de 2^{\aleph_0} elementos de $[Y]^{n-1} \cap \mathbb{Q}$ disjuntos dos a dos. Por hipótesis de inducción existen $s, t \in F \setminus F_0$ distintos y tales que $s[n-1] \cup t[n-1]$ está totalmente coloreado. Pero entonces $t|_{n-1} \in U_{s|_{n-1}} \cap A$, luego $g(t|_{n-1}) \notin I$, pero $g(t|_{n-1}) = t(n-1) \in I$, contradicción.

Observemos que g es un subespacio de X^n , luego tiene un subconjunto denso numerable g_0 , que será también una función parcial de X^{n-1} en X , luego existe $\alpha < 2^{\aleph_0}$ tal que $g_0 = f_\alpha : A_0 \rightarrow X$. Vamos a probar que para todo $s \in F$ se cumple

$$\omega_g(s|_{n-1}) = \omega_{f_\alpha}(s|_{n-1}).$$

Para ello tomamos un abierto $U \subset X^{n-1}$ tal que $s|_{n-1} \in U$ y basta probar que $\overline{g[U_{s|_{n-1}} \cap A]} = \overline{f_\alpha[U_{s|_{n-1}} \cap A_0]}$. Una inclusión es obvia. Para la opuesta basta demostrar que $g[U_{s|_{n-1}} \cap A] \subset \overline{f_\alpha[U_{s|_{n-1}} \cap A_0]}$.

Supongamos que $t \in F$ cumple que $t|_{n-1} \in U_{s|_{n-1}}$. Sea B_{n-1}^* un entorno abierto de $g(t|_{n-1}) = t(n-1)$. Tenemos que encontrar un $u \in F$ de manera que $u|_{n-1} \in U_{s|_{n-1}} \cap A_0$ y $u(n-1) \in B_{n-1}^*$. Sabemos que $t|_{n-1} \in U$ y que si

$i < n - 1$ entonces $t(i) \neq s(i)$ y $\{t(i), s(i)\} \in C$. Como C es abierto podemos tomar abiertos B_i^* en X tales que

$$t|_{n-1} \in B_0^* \times \cdots \times B_{n-2}^* \subset U$$

y de modo que si $q \in B_0^* \times \cdots \times B_{n-2}^*$ entonces, para todo $i < n - 1$ se cumple $q(i) \neq s(i)$ y $\{q(i), s(i)\} \in C$. De este modo $t \in (B_0^* \times \cdots \times B_{n-1}^*) \cap g$, luego el miembro derecho es un abierto no vacío en g . Como f_α es denso en g , existe un $u \in (B_0^* \times \cdots \times B_{n-1}^*) \cap f_\alpha$, es decir, $u \in F$, $u|_{n-1} \in (B_0^* \times \cdots \times B_{n-2}^*) \cap A_0$ y $u(n-1) \in B_{n-1}^*$. Pero esto implica que $u \in U_{s|_{n-1}}$, luego cumple lo pedido.

Como $|F - F_0| < 2^{\aleph_0}$, existe un $s \in F_0$ tal que $s(0) = x_\delta$, con $\alpha < \delta$ (donde α es el ordinal que acabamos de probar que cumple $\omega_g(s|_{n-1}) = \omega_{f_\alpha}(s|_{n-1})$). Por definición de F_0 tenemos que $s(n-1) \in \omega_g(s|_{n-1}) = \omega_{f_\alpha}(s|_{n-1})$ y por la propiedad c) concluimos que $\omega_{f_\alpha}(s|_{n-1})$ no puede ser totalmente no coloreado, luego podemos tomar $u, v \in \omega_{f_\alpha}(s|_{n-1})$ distintos entre sí y tales que $\{u, v\} \in C$. Sean I, J abiertos tales que $(u, v) \in I \times J \subset C^*$.

Tomamos $U = X^{n-1}$. Puesto que $u \in \omega_{f_\alpha}(s|_{n-1})$, se cumple que

$$\overline{f_\alpha[U_{s|_{n-1}} \cap A_0]} \cap I \neq \emptyset,$$

luego existe un $p^* \in F$ tal que $p^*|_{n-1} \in U_{s|_{n-1}} \cap A_0$ y $f_\alpha(p^*|_{n-1}) = p^*(n-1) \in I$. En particular $p^*[n-1] \cup s[n-1]$ está completamente coloreado.

Como C es abierto, se comprueba fácilmente que podemos tomar un abierto $U \subset X^{n-1}$ tal que $s|_{n-1} \in U$ y $p^*[n-1] \cup q[n-1]$ esté totalmente coloreado para todo $q \in U$. Como $v \in \omega_{f_\alpha}(s|_{n-1})$, tenemos que $\overline{f_\alpha[U_{s|_{n-1}} \cap A_0]} \cap J \neq \emptyset$, luego existe un $q^* \in F$ tal que $q^*|_{n-1} \in U_{s|_{n-1}} \cap A_0$ y $f_\alpha(q^*|_{n-1}) = q^*(n-1) \in J$, y ahora podemos concluir que $p^*[n-1] \cup q^*[n-1]$ está totalmente coloreado. Más aún, lo mismo vale para $p^*[n] \cup q^*[n]$, ya que $p^*(n) \in I$ y $q^*(n) \in J$. Esto termina la prueba de (*).

Veamos ahora la segunda parte del enunciado. Sea

$$B = \{p \in \mathbb{Q} \mid |\{y \in Y \mid p \cup \{y\} \in \mathbb{Q}\}| < 2^{\aleph_0}\}.$$

Veamos que $|B| < 2^{\aleph_0}$. En caso contrario podríamos construir una sucesión $\{p_\alpha\}_{\alpha < 2^{\aleph_0}}$ en B tal que si $\beta < \alpha < 2^{\aleph_0}$

$$p_\alpha \not\subset p_\beta \cup \{y \in Y \mid p_\beta \cup \{y\} \in \mathbb{Q}\},$$

pero dicha familia sería una anticadena en \mathbb{Q} de cardinal 2^{\aleph_0} , en contradicción con el apartado anterior. En efecto, si r extendiera a p_α y p_β , entonces

$$p_\alpha \subset r \subset p_\beta \cup \{y \in Y \mid p_\beta \cup \{y\} \in \mathbb{Q}\}.$$

Así pues, $|B| < 2^{\aleph_0}$ y lo mismo vale para $\bigcup B$. Ahora basta reemplazar Y por $Y' = Y \setminus \bigcup B$. Si llamamos $\mathbb{Q}' \subset \mathbb{Q}$ al correspondiente c.p.o., es claro que sigue cumpliendo la condición de cadena 2^{\aleph_0} , y si $s \in \mathbb{Q}'$, entonces

$$|\{y \in Y \mid s \cup \{y\} \in \mathbb{Q}\}| = 2^{\aleph_0},$$

luego también $|\{y \in Y' \mid s \cup \{y\} \in \mathbb{Q}\}| = 2^{\aleph_0}$, pero esto es exactamente lo mismo que $|\{y \in Y' \mid s \cup \{y\} \in \mathbb{Q}'\}| = 2^{\aleph_0}$. ■

Ahora probamos que los c.p.o.s construidos en el teorema anterior resuelven posibles incumplimientos de ACA:

Teorema 9.36 (HC) *Si X es un espacio de Hausdorff con una base numerable y C es una coloración abierta en X , entonces, o bien X es unión de una cantidad numerable de conjuntos totalmente no coloreados, o en caso contrario el c.p.o. \mathbb{Q} construido en el teorema anterior cumple la c.c.n. y $|\mathbb{Q}| = \aleph_1$, y $\mathbb{1} \Vdash \bigcup \Gamma$ es un subconjunto de \check{X} totalmente coloreado y no numerable.*

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC + HC. Sólo hay que probar la última parte. Sea G un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre M y sea $H = \bigcup G \subset X$. Es obvio que H está totalmente coloreado. Supongamos que es numerable $^{M[G]}$. Entonces, la c.c.n. implica (por 5.5) que existe $A \in M$ numerable M tal que $H \subset A \subset X$. Así pues, el conjunto

$$D = \{q \in \mathbb{Q} \mid q \setminus A \neq \emptyset\} \in M$$

es denso en \mathbb{Q} , por la propiedad b) del teorema anterior, luego existe $q \in D \cap G$, luego existe un $x \in q \setminus A$, pero entonces $x \in q \subset H$ y $x \in X \setminus A \subset X \setminus H$, contradicción. ■

Recordemos la iteración construida en la prueba del teorema 8.38 para probar la consistencia del axioma de Martin, particularizada al caso $\kappa = \aleph_2$. Partimos de un modelo transitivo numerable M de ZFC en el que $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ y $2^{\aleph_1} = \aleph_2$, lo que garantiza la hipótesis de que $2^{<\kappa} = \kappa$. En la prueba se construye una iteración con soportes finitos

$$(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \kappa}, \{(\check{\nu}_\delta, \leq_\delta, \check{\mathcal{O}})\}_{\delta < \kappa}),$$

donde cada ν_δ es un cardinal (en M) menor que κ (que, de hecho, podemos suponer no numerable). En el caso particular que estamos considerando tendremos que todos ellos son iguales a ω_1 . En definitiva, tenemos una iteración con soportes finitos

$$(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \omega_2}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \omega_2})$$

tal que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta = \check{\omega}_1 \wedge \pi_\delta \text{ cumple la c.c.n.} \quad (*)$$

(en la primera parte hay que entender que nos referimos a π_δ como conjunto, mientras que en la segunda nos referimos al c.p.o. $(\pi_\delta, \leq_\delta, \mathbb{1}_{\pi_\delta})$).

En 8.38 se demuestra que cualquier iteración con soportes finitos que cumpla la condición (*) cumple también que cada \mathbb{P}_δ tiene (en M) un subconjunto denso $\overline{\mathbb{P}}_\delta$ tal que $|\overline{\mathbb{P}}_\delta| = \aleph_1$ para todo $\delta < \omega_2$, y $|\overline{\mathbb{P}}_{\omega_2}| = \aleph_2$. A su vez, esto basta para asegurar que, si G es un filtro \mathbb{P}_{ω_2} -genérico sobre M , la extensión $M[G]$ tiene los mismos cardinales y cofinalidades que M , la función del continuo por encima de \aleph_2 es la misma que en M y $2^{\aleph_0} \leq 2^{\aleph_1} \leq \aleph_2$.

Notemos además que en las extensiones intermedias $M[G_\delta]$, con $\delta < \omega_2$, se cumple la hipótesis del continuo, pues el número (en M) de buenos $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ -nombres para subconjuntos de $\check{\omega}$ es a lo sumo $(\aleph_1^{<\aleph_1})^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0} = \aleph_1$, y basta aplicar el teorema 5.22.

Vamos a modificar como sigue la construcción recurrente considerada en 8.38. Supuesto definido $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$, distinguimos dos casos: si $\alpha = 2\alpha_0 + 1$, tomamos en M una enumeración $\{\leq_\gamma^{\alpha_0}\}_{\gamma < \omega_2}$ de todos los buenos $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombres para subconjuntos de $\omega_1 \times \omega_1$ y suponemos definidos los $\leq_\gamma^{\beta_0}$, para $\beta_0 < \alpha_0$ y $\gamma < \omega_2$. Ahora consideramos la función $f : \omega_2 \longrightarrow \omega_2 \times \omega_2$ construida al principio de la prueba de 8.38, calculamos $f(\alpha_0) = (\beta_0, \gamma)$, con $\beta_0 \leq \alpha_0$ y continuamos la construcción de π_α sin cambio alguno, pero usando el $\bar{\mathbb{P}}_\beta$ -nombre $\leq_\gamma^{\beta_0}$.

Si $\alpha = 2\alpha_0$ definiremos π_α más adelante de modo que se cumplirá también la condición (*).

De momento observamos que, independientemente de cómo definamos π_α cuando α es par, en $M[G]$ seguirá cumpliéndose $\text{AM}(\aleph_1)$, y en particular tendremos que $2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_1} = \aleph_2$ (luego en $M[G]$ se cumple AM). En efecto, la prueba vale sin más cambios que los siguientes: encontramos un $\beta < \omega_2$ que cumple $R, D \in M[G_\beta]$, y cambiando si es preciso β por $\beta + 1$, podemos suponer que $\beta = 2\beta_0 + 1$, lo que hace que $R = (\leq_\gamma^{\beta_0})_{G_\beta}$ para cierto $\gamma < \omega_2$. Entonces tomamos un $\alpha_0 \geq \beta_0$ tal que $f(\alpha_0) = (\beta_0, \gamma)$ y llamamos $\alpha = 2\alpha_0 + 1 < \omega_2$.

Así pues, para garantizar que en $M[G]$ se cumpla $\text{AM} + 2^{\aleph_0} = \aleph_2$ tenemos libertad para definir la iteración sobre los ordinales pares siempre y cuando la definición respete la condición (*). Ahora vamos a probar que podemos aprovechar este grado de libertad para asegurar que la extensión genérica cumpla ACA:

Teorema 9.37 *Existe un modelo transitivo de $\text{ZFC} + 2^{\aleph_0} = \aleph_2 + \text{AM} + \text{ACA}$.*

DEMOSTRACIÓN: Vamos a probar que podemos construir el modelo deseado definiendo oportunamente los nombres π_α cuando $\alpha < \omega_2$ es par en la variante de la construcción de 8.38 que acabamos de describir. Consideramos, pues, un modelo M en las condiciones indicadas y vamos a definir una iteración $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \omega_2}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \omega_2})$ con soportes finitos o, más precisamente, vamos a completar la construcción indicada especificando la definición de π_α cuando $\alpha < \omega_2$ es par.

Antes observemos que en la construcción de la iteración podemos ir construyendo a la vez una sucesión creciente de ordinales $\{\theta_\delta\}_{\delta < \omega_2}$ en ω_2 junto con biyecciones $h_\delta : \theta_\delta \longrightarrow \bar{\mathbb{P}}_\delta$, de modo que los diagramas siguientes comuten, para todo $\delta < \epsilon < \omega_2$:

$$\begin{array}{ccc} \theta_\epsilon & \xrightarrow{h_\epsilon} & \bar{\mathbb{P}}_\epsilon \\ i \uparrow & & \uparrow i_{\delta\epsilon} \\ \theta_\delta & \xrightarrow{h_\delta} & \bar{\mathbb{P}}_\delta \end{array}$$

Notemos que en particular $\theta_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} \theta_\delta$, para todo límite $\lambda < \omega_2$. Finalmente las aplicaciones h_δ definen una biyección $h : \omega_2 \longrightarrow \bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}$, de modo que si identificamos cada $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ con $i_{\delta\omega_2}[\bar{\mathbb{P}}_\delta]$, entonces se cumple que $h[\theta_\delta] = \bar{\mathbb{P}}_\delta$.

La construcción se simplifica un poco si observamos que nos basta probar que existe un filtro G con el cual $M[G]$ cumple ACA, pues entonces podemos razonar por reducción al absurdo suponiendo $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash \neg\text{ACA}$.

Entonces, si G es cualquier filtro \mathbb{P}_{ω_2} -genérico sobre M , en $M[G]$ existe un espacio de Hausdorff X con una base numerable y una coloración abierta C en X de modo que ni X tiene un subconjunto totalmente coloreado no numerable ni es unión de una cantidad numerable de conjuntos totalmente no coloreados.

Al igual que hemos razonado al principio de la prueba de 9.35, en $M[G]$ tiene que cumplirse que $|X| = 2^{\aleph_0}$, es decir, $|X| = \aleph_2$. Por lo tanto, transportando toda la estructura de X a ω_2 mediante una biyección (en $M[G]$), podemos suponer que el conjunto subyacente al espacio topológico X es $X = \omega_2$.

Sea \mathcal{B} una base numerable de X , aunque, por razones técnicas, en lugar de considerarla como un mero conjunto numerable de abiertos o como una sucesión $\{B_n\}_{n \in \omega}$, vamos a considerar que $\mathcal{B} \subset \omega \times X \subset \omega \times \omega_2$, de modo que los abiertos básicos son los conjuntos $B_n = \{x \in X \mid (n, x) \in \mathcal{B}\}$. Es claro que toda familia numerable de subconjuntos de X puede codificarse así.

Así pues, podemos tomar \mathbb{P}_{ω_2} -nombres $\mathcal{X}, \mathcal{B}, \mathcal{C}$ (en M) con la propiedad de que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash \mathcal{X} \subset \check{\omega}_2 \wedge \mathcal{B}$ es una base numerable para una topología de Hausdorff en $\mathcal{X} \wedge \mathcal{C}$ es una coloración abierta en $\mathcal{X} \wedge \mathcal{X}$ no contiene un subconjunto no numerable totalmente coloreado ni es unión numerable de conjuntos totalmente no coloreados.

Más concretamente, podemos suponer que \mathcal{X} es un buen $\bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}$ -nombre para un subconjunto de $\check{\omega}_2$, con lo que $\mathcal{X} = \bigcup_{\delta < \omega_2} \{\check{\delta}\} \times A_\delta$, donde A_δ es una anticadena (numerable) en $\bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}$. Si llamamos $\mathcal{X}^*(\delta) = h^{-1}[A_\delta]$, tenemos una aplicación $\mathcal{X}^* : \omega_2 \longrightarrow [\omega_2]^{\leq \aleph_0}$ (en M) que determina completamente a \mathcal{X} .

Similarmente, suponemos que \mathcal{B} es un buen $\bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}$ -nombre para un subconjunto de $\check{\omega} \times \omega_2$, luego viene determinado por una aplicación $\mathcal{B}^* : \omega \times \omega_2 \longrightarrow [\omega_2]^{\leq \aleph_0}$.

Por último, podemos suponer que \mathcal{C} es un buen nombre para un subconjunto de $[\check{\omega}_2]^2$, luego está determinado por una aplicación $\mathcal{C}^* : [\omega_2]^2 \longrightarrow [\omega_2]^{\leq \aleph_0}$.

Observemos ahora que la sucesión $\{\theta_\delta\}_{\delta < \omega_2}$ es normal, por lo que el conjunto de sus puntos fijos $C_0 = \{\delta < \omega_2 \mid \theta_\delta = \delta\}$ es c.n.a. en ω_2 .

Para cada $\alpha < \omega_2$ definimos $\mathcal{X}_\alpha^* : \alpha \longrightarrow [\alpha]^{\leq \aleph_0}$ como la aplicación dada por $\mathcal{X}_\alpha^*(\delta) = \mathcal{X}^*(\delta) \cap \alpha$. Si definimos $F : \omega_2 \longrightarrow \omega_2$ mediante $F(\alpha) = \bigcup \mathcal{X}^*[\alpha]$ (lo cual es posible, porque $F(\alpha)$ es una unión de a lo sumo \aleph_1 conjuntos numerables, luego está acotado en ω_2), el conjunto C_1 formado por los ordinales de C_0 cerrados para F es c.n.a. en ω_2 , y si $\alpha \in C_2$ tenemos que $\mathcal{X}_\alpha^* = \mathcal{X}^*|_\alpha$, y además

$\mathcal{X}_\alpha^*(\delta) \subset \alpha = \theta_\alpha$, por lo que $A_\delta = h[\mathcal{X}_\alpha^*(\delta)] \subset \bar{\mathbb{P}}_\delta$. Esto significa que \mathcal{X}_α^* determina un $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre $\mathcal{X}_\alpha = \bigcup_{\delta < \alpha} \{\check{\delta}\} \times A_\delta$, que claramente cumple

$$(\mathcal{X}_\alpha)_{G_\alpha} = \mathcal{X}_G \cap \alpha.$$

Ahora definimos $\mathcal{B}_\alpha^* : \omega \times \alpha \longrightarrow [\alpha]^{\leq \aleph_0}$ mediante $\mathcal{B}_\alpha^*(n, \delta) = \mathcal{B}^*(n, \delta) \cap \alpha$. El mismo razonamiento nos permite definir un c.n.a. $C_2 \subset C_1$ de modo que si $\alpha \in C_2$ entonces \mathcal{B}_α^* define un $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre \mathcal{B}_α tal que

$$(\mathcal{B}_\alpha)_{G_\alpha} = \mathcal{B}_G \cap (\omega \times \alpha),$$

y es claro entonces que $\mathbb{1}_{\bar{\mathbb{P}}_\alpha} \Vdash \mathcal{X}_\alpha \subset \omega_2 \wedge \mathcal{B}_\alpha$ determina una base numerable para una topología de Hausdorff en \mathcal{X}_α .

Igualmente podemos definir una aplicación $\mathcal{C}_\alpha^* : [\alpha]^2 \longrightarrow [\alpha]^{\leq \aleph_0}$ mediante $\mathcal{C}_\alpha^*(\{\delta, \epsilon\}) = \mathcal{C}^*(\{\delta, \epsilon\}) \cap \alpha$, y nuevamente podemos formar un c.n.a. $C_3 \subset C_2$ de modo que si $\alpha \in C_3$ entonces \mathcal{C}_α^* defina un $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre \mathcal{C}_α tal que

$$(\mathcal{C}_\alpha)_G = \mathcal{C}_G \cap [\alpha]^2,$$

y consecuentemente $\mathbb{1}_{\bar{\mathbb{P}}_\alpha} \Vdash \mathcal{C}_\alpha$ es una coloración abierta en \mathcal{X}_α con la topología definida por \mathcal{B}_α .

Ahora observamos que, por el teorema 9.34, que un espacio no sea unión de una cantidad numerable de conjuntos totalmente no coloreados equivale a que no sea unión numerable de conjuntos cerrados totalmente no coloreados. Si $\{B_n\}_{n \in \omega}$ es una base de un espacio topológico X , todo cerrado en X es de la forma $C_a = X \setminus \bigcup_{n \in a} B_n$, para cierto $a \subset \omega$, y toda familia numerable de cerrados de X puede codificarse por un conjunto $a \subset \omega \times \omega$ (si llamamos $a_n = \{i \in \omega \mid (n, i) \in a\}$, la familia codificada por a es $\{C_{a_n}\}_{n \in \omega}$).

Fijado $\delta < \omega_2$, si σ es un buen $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ -nombre (en M) para un subconjunto de $\check{\omega} \times \omega$, entonces $a = \sigma_{G_\delta}$ determina a través de la base \mathcal{B}_G una familia numerable de cerrados $\{C_n\}_{n \in \omega}$ en \mathcal{X}_G , luego, o bien no cubren todo el espacio, o bien alguno de ellos no es totalmente no coloreado.

En el primer caso existe un $\beta \in \mathcal{X}_G \subset \omega_2$ tal que β no pertenece a ninguno de los C_n , es decir, para cada n existe un $i_n \in a_n$ tal que $\beta \in (\mathcal{B}_G)_{i_n}$ (o equivalentemente, $(i_n, \beta) \in \mathcal{B}_G$). En el segundo caso existe un $n \in \omega$ y existen $\beta, \gamma \in C_{a_n}$ (es decir, existen $i, j \in a_n$ tales que $(i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B}_G$) de modo que $\{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}_G$.

Si llamamos ϵ al menor elemento de C_3 mayor que δ y β en el primer caso o que δ, β y γ en el segundo, hemos probado que

$$\mathbb{1}_{\bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}} \Vdash \forall \epsilon \in \check{C}_3 (\check{\delta} < \epsilon \wedge (\forall \beta < \epsilon \wedge n \in \omega \forall i \in i_{\delta \omega_2}(\sigma)_n (i, \beta) \in \mathcal{B}) \vee$$

$$(\forall \beta \gamma < \epsilon \forall n \in \omega \forall i j \in i_{\delta \omega_2}(\sigma)_n ((i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B} \wedge \{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}))).$$

Por consiguiente existe un $\bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}$ -nombre τ (en M) tal que

$$\mathbb{1}_{\bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}} \Vdash \tau \in \check{C}_3 \wedge ((\check{\delta} < \epsilon \wedge (\forall \beta < \epsilon \wedge n \in \omega \forall i \in i_{\delta \omega_2}(\sigma)_n (i, \beta) \in \mathcal{B}) \vee$$

$$(\forall \beta \gamma < \epsilon \forall n \in \omega \forall i j \in i_{\delta \omega_2}(\sigma)_n ((i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B} \wedge \{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}))).$$

En M podemos considerar el conjunto $A = \{\epsilon \in C_3 \mid \bigvee p \in \mathbb{P}_{\omega_2} p \Vdash \tau = \check{\epsilon}\}$, y para cada $\epsilon \in A$ podemos elegir un $p_\epsilon \in \mathbb{P}_{\omega_2}$ tal que $p_\epsilon \Vdash \tau = \epsilon$. Es claro entonces que los p_ϵ son incompatibles dos a dos, y como \mathbb{P}_{ω_2} cumple la c.c.n., concluimos que A es numerable, luego podemos definir ϵ_δ^σ como el menor elemento de C_3 mayor que todos los elementos de A . Más aún, como en M hay a lo sumo \aleph_1 buenos $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ -nombres para subconjuntos de $\omega \times \omega$, podemos definir $\epsilon \in C_3$ como el menor elemento mayor que todos los ϵ_δ^σ . Concluimos que, para todo σ ,

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash \check{\epsilon}_\delta \in \check{C}_3 \wedge ((\check{\delta} < \check{\epsilon}_\delta \wedge (\forall \beta < \check{\epsilon}_\delta \wedge n \in \omega \forall i \in i_{\delta\omega_2}(\sigma)_n (i, \beta) \in \mathcal{B}) \vee \\ (\forall \beta \gamma < \check{\epsilon}_\delta \forall n \in \omega \forall ij \in i_{\delta\omega_2}(\sigma)_n ((i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B} \wedge \{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}))). \end{aligned}$$

Si llamamos C_4 al conjunto de los ordinales de C_3 cerrados para $\delta \mapsto \epsilon_\delta$, se trata de un conjunto c.n.a. en ω_2 y si $\alpha \in C_4$, para cada $\delta < \alpha$ se cumple que $\delta < \epsilon_\delta < \alpha$, luego, para todo buen $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ -nombre para un subconjunto de $\omega \times \omega$:

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash ((\forall \beta < \check{\alpha} \wedge n \in \omega \forall i \in i_{\delta\omega_2}(\sigma)_n (i, \beta) \in \mathcal{B}) \vee \\ (\forall \beta \gamma < \check{\alpha} \forall n \in \omega \forall ij \in i_{\delta\omega_2}(\sigma)_n ((i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B} \wedge \{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}))), \end{aligned}$$

o también

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_{\bar{\mathbb{P}}_\alpha} \Vdash ((\forall \beta < \check{\alpha} \wedge n \in \omega \forall i \in i_{\delta\alpha}(\sigma)_n (i, \beta) \in \mathcal{B}_\alpha) \vee \\ (\forall \beta \gamma < \check{\alpha} \forall n \in \omega \forall ij \in i_{\delta\alpha}(\sigma)_n ((i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B}_\alpha \wedge \{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}_\alpha))). \end{aligned}$$

Llamemos C_5 al conjunto de los puntos límite de C_4 , que es también c.n.a. en ω_2 . Observemos ahora que si $\alpha \in C_5$, un buen $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre σ para un subconjunto de $\omega \times \omega$ es de la forma

$$\sigma = \bigcup_{m, n \in \omega} \{\text{p.o.}(\check{m}, \check{n})\} \times A_{m, n},$$

donde $A_{m, n}$ es una anticadena (numerable) en $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$, que se corresponde a través de la biyección h con el conjunto numerable $h^{-1}[A_{m, n}] \subset \alpha$. Si además $\text{cf } \alpha = \aleph_1$ existe un $\delta \in C_4$ tal que $\delta < \alpha$ y δ acota superiormente a todos los conjuntos $h^{-1}[A_{m, n}]$, luego $A_{m, n} \subset h[\delta] = h[\theta_\delta] = \bar{\mathbb{P}}_\delta$. Así pues, todo buen $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre para un subconjunto de $\omega \times \omega$ es un buen $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ -nombre para un subconjunto de $\omega \times \omega$, para cierto $\delta \in C_4$, $\delta < \alpha$.

Así, si $\alpha \in C_5$ y $\text{cf } \alpha = \aleph_1$, para cada buen $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre para un subconjunto de $\omega \times \omega$ se cumple:

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_{\bar{\mathbb{P}}_\alpha} \Vdash ((\forall \beta < \check{\alpha} \wedge n \in \omega \forall i \in \sigma_n (i, \beta) \in \mathcal{B}_\alpha) \vee \\ (\forall \beta \gamma < \check{\alpha} \forall n \in \omega \forall ij \in \sigma_n ((i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B}_\alpha \wedge \{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}_\alpha))). \end{aligned}$$

Por consiguiente:

$$\begin{aligned} \mathbb{1}_{\bar{\mathbb{P}}_\alpha} \Vdash \bigwedge a \in \mathcal{P}(\omega \times \omega) ((\forall \beta < \check{\alpha} \wedge n \in \omega \forall i \in a_n (i, \beta) \in \mathcal{B}_\alpha) \vee \\ (\forall \beta \gamma < \check{\alpha} \forall n \in \omega \forall ij \in a_n ((i, \beta), (j, \gamma) \notin \mathcal{B}_\alpha \wedge \{\beta, \gamma\} \in \mathcal{C}_\alpha))), \end{aligned}$$

pero esto equivale a

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \mathcal{X}_\alpha \text{ no es unión numerable de conjuntos totalmente no coloreados.}$$

En resumen, si llamamos $C = C_5$ y $E = \{\alpha \in \omega_2 \mid \text{cf } \alpha = \aleph_1\}$, bajo la hipótesis de que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash \neg \text{ACA}$, hemos encontrado \mathbb{P}_{ω_2} -nombres \mathcal{X} , \mathcal{B} y \mathcal{C} tales que

$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash \mathcal{X} \subset \check{\omega}_2 \wedge \mathcal{B}$ determina una base numerable para una topología de Hausdorff en $\mathcal{X} \wedge \mathcal{C}$ es una coloración abierta en $\mathcal{X} \wedge \mathcal{X}$ no contiene un subconjunto no numerable totalmente coloreado ni es unión numerable de conjuntos totalmente no coloreados.

y para todo $\alpha \in C \cap E$ se cumple:

$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \mathcal{X}_\alpha \subset \check{\alpha} \wedge \mathcal{B}_\alpha$ determina una base numerable para una topología de Hausdorff en $\mathcal{X}_\alpha \wedge \mathcal{C}_\alpha$ es una coloración abierta en $\mathcal{X}_\alpha \wedge \mathcal{X}_\alpha$ no es unión numerable de conjuntos totalmente no coloreados.

Ahora tenemos que completar la definición de la iteración de c.p.o.s para que lo segundo contradiga lo primero.

Para ello observamos que, a través de la biyección h (que se construye recurrentemente al mismo tiempo que la iteración de c.p.o.s) el nombre \mathcal{X} se corresponde con la función $\mathcal{X}^* : \omega_2 \longrightarrow [\omega_2]^{\leq \aleph_0}$, que a su vez puede codificarse como un subconjunto $\mathcal{X}' \subset \omega_2 \times \omega_2$ (de modo que $\mathcal{X}'(\delta) = \{\epsilon \in \omega_2 \mid (\delta, \epsilon) \in \mathcal{X}'\}$) y entonces, si $\alpha \in C$, se cumple que \mathcal{X}_α^* se corresponde con $\mathcal{X}' \cap (\alpha \times \alpha)$. Igualmente la función \mathcal{B}^* puede codificarse con un subconjunto $\mathcal{B}' \subset \omega \times \omega_2 \times \omega_2$ y \mathcal{C}^* mediante un subconjunto $\mathcal{C}' \subset \omega_2 \times \omega_2 \times \omega_2$.

En total, $(\mathcal{C}^*, \mathcal{B}^*, \mathcal{C}^*)$ puede codificarse mediante un subconjunto de

$$S = (\omega_2 \times \omega_2 \times \{0\}) \cup (\omega \times \omega_2 \times \omega_2 \times \{1\}) \cup (\omega_2 \times \omega_2 \times \omega_2 \times \{2\}).$$

Fijemos en M una biyección $c : \omega_2 \longrightarrow S$. Entonces, el conjunto C' formado por los ordinales $\alpha < \omega_2$ tales que

$$c[\alpha] = (\alpha \times \alpha \times \{0\}) \cup (\omega \times \alpha \times \alpha \times \{1\}) \cup (\alpha \times \alpha \times \alpha \times \{2\})$$

es c.n.a. en ω_2 . En efecto, es claro que es cerrado, y para probar que es no acotado, para cada $\delta < \omega_2$ definimos $u(\delta)$ como el mínimo ordinal $\alpha > \delta$ tal que $c(\delta)$ está contenido en el miembro derecho de la fórmula anterior y $v(\alpha)$ como el mínimo $\beta > \delta$ tal que dicho miembro derecho está contenido en $c[\beta]$. Así, C' contiene al c.n.a. formado por los ordinales cerrados para u y v .

El conjunto $E' = C' \cap E \cap \{2\alpha \mid \alpha < \omega_2\}$ es estacionario en ω_2 . Vamos a suponer que M cumple $\Diamond_{E'}$. En particular esto sucede si cumple \Diamond_E o, más en particular, si cumple $V = L$ (teorema 3.33).

Sea $\{A'_\alpha\}_{\alpha \in E'}$ una sucesión $\diamondsuit_{E'}$ en M y sea $A_\alpha = c[A'_\alpha]$. Así, la propiedad de las sucesiones $\diamondsuit_{E'}$ se traduce en que $A_\alpha \subset c[\alpha]$ y, para todo $A \subset S$, el conjunto

$$\{\alpha \in E' \mid A \cap c[\alpha] = A_\alpha\}$$

es estacionario en ω_2 . Pasemos ya a terminar la definición de la iteración de c.p.o.s. Para ello suponemos definida $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$ con $\alpha = 2\alpha_0$, así como los subconjuntos densos $\{\bar{\mathbb{P}}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}$ y las biyecciones $h_\alpha : \theta_\delta \longrightarrow \bar{\mathbb{P}}_\delta$, para $\delta \leq \alpha$. Distinguimos dos casos. El primero se da cuando se cumplen las condiciones siguientes:

- a) $\alpha \in E'$ y $\theta_\alpha = \alpha$.
- b) El conjunto A_α define una función $\mathcal{X}_\alpha^* : \alpha \longrightarrow [\alpha]^{\leq \aleph_0}$ mediante $\mathcal{X}_\alpha^*(\delta) = \{\epsilon \in \alpha \mid (\delta, \epsilon, 0) \in A_\alpha\}$, la cual, a través de h_α , determina a su vez un buen $\bar{\mathbb{P}}_\alpha$ -nombre \mathcal{X}_α para un subconjunto de $\check{\alpha}$.
- c) El conjunto A_α define una función $\mathcal{B}_\alpha^* : \omega \times \alpha \longrightarrow [\alpha]^{\leq \aleph_0}$ dada por $\mathcal{B}_\alpha^*(n, \delta) = \{\epsilon \in \alpha \mid (n, \delta, \epsilon, 1) \in A_\alpha\}$, la cual, a través de h_α , determina un buen nombre \mathcal{B}_α para un subconjunto de $\omega \times \check{\alpha}$.
- d) El conjunto A_α define una función $\mathcal{C}_\alpha^* : [\alpha]^2 \longrightarrow [\alpha]^{\leq \aleph_0}$ mediante

$$\mathcal{C}_\alpha^*(\{\gamma, \delta\}) = \{\epsilon \in \alpha \mid (\gamma, \delta, \epsilon, 3) \in A_\alpha\},$$

la cual, a través de h_α , determina un buen nombre \mathcal{C}_α para un subconjunto de $[\alpha]^2$.

- e) $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \mathcal{X}_\alpha \subset \check{\alpha} \wedge \mathcal{B}_\alpha$ determina una base numerable para una topología de Hausdorff en $\mathcal{X}_\alpha \wedge \mathcal{C}_\alpha$ es una coloración abierta en $\mathcal{X}_\alpha \wedge \mathcal{C}_\alpha$ no es unión numerable de conjuntos totalmente no coloreados.

En estas condiciones, definimos $\pi_\alpha \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ de modo que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha}$ fuerce que π_α tiene como conjunto subyacente a ω_1 y es isomorfo al c.p.o. construido en 9.35. (Esto es posible porque sabemos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \text{HC}$.)

En el caso en que no se cumpla alguna de las condiciones anteriores, definimos π_α de modo que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha}$ fuerce que π_α cumple (*).

Esto completa la definición de la iteración. Ahora podemos continuar el argumento por reducción al absurdo. Tenemos unos nombres \mathcal{X} , \mathcal{B} y \mathcal{C} , que determinan funciones \mathcal{X}^* , \mathcal{B}^* , \mathcal{C}^* , que a su vez determinan un conjunto $A \subset S$ de la forma que hemos explicado. Además en función de estos objetos hemos construido un c.n.a. C y podemos tomar un ordinal

$$\alpha \in C \cap \{\alpha \in E' \mid A \cap c[\alpha] = A_\alpha\},$$

pues el conjunto de la derecha es estacionario. Como $\alpha \in E'$, en particular $\alpha = 2\alpha_0$. Como $\alpha \in C$, en particular $\alpha = \theta_\alpha$, y como A es el conjunto determinado por \mathcal{X}^* , \mathcal{B}^* y \mathcal{C}^* , es inmediato que las funciones \mathcal{X}_α^* , \mathcal{B}_α^* y \mathcal{C}_α^*

definidas a partir de A_α son las mismas que hemos definido antes a partir de \mathcal{X}^* , \mathcal{B}^* y \mathcal{C}^* , luego se cumplen todos los requisitos del primer caso de la definición de π_α .

Por lo tanto, en $M[G_\alpha]$ tenemos que $X_\alpha = (\mathcal{X}_\alpha)_{G_\alpha}$ es un espacio de Hausdorff con una base numerable determinada por $B_\alpha = (\mathcal{B}_\alpha)_{G_\alpha}$, que $C_\alpha = (\mathcal{C}_\alpha)_{G_\alpha}$ es una coloración abierta en X_α y que X_α no es unión numerable de conjuntos totalmente no coloreados.

Consecuentemente, según el teorema 9.36, en $M[G_{\alpha+1}] = M[G_\alpha][H]$, donde H es un filtro $(\pi_\alpha)_{G_\alpha}$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$, se cumple que X_α tiene un subconjunto totalmente coloreado no numerable N .

Por otra parte, en $M[G]$ tenemos que $C = \mathcal{C}_G$ es una coloración en $X = \mathcal{X}_G$ respecto a la que X no tiene subconjuntos no numerables totalmente coloreados. Ahora bien, $X_\alpha = X \cap \alpha \subset X$, y $C_\alpha = C \cap [\alpha]^2$, por lo que N es un subconjunto totalmente coloreado de X respecto a C , y es no numerable en $M[G]$ porque la extensión conserva los cardinales, con lo que tenemos una contradicción. ■

Vamos a probar otro resultado sobre modelos que cumplen ACA, pero antes necesitamos un resultado técnico elemental sobre extensiones genéricas:

Teorema 9.38 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. con la c.c.n. y sea $\{p_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ una familia de condiciones de \mathbb{P} . Entonces existe un $\alpha_0 < \omega_1$ tal que para todo $\alpha_0 \leq \alpha < \omega_1$ se cumple que $p_\alpha \Vdash \{\beta < \omega_1 \mid \check{p}_\beta \in \Gamma\}$ es no numerable.*

DEMOSTRACIÓN: En caso contrario existe un conjunto W de \aleph_1 ordinales $\alpha < \omega_1$ tales que

$$p_\alpha \Vdash \{\beta < \omega_1 \mid \check{p}_\beta \in \Gamma\} \text{ es numerable.}$$

Por 8.13 existe un $\eta_\alpha < \omega_1$ tal que

$$p_\alpha \Vdash \{\beta < \omega_1 \mid \check{p}_\beta \in \Gamma\} \subset \check{\eta}_\alpha,$$

donde la sucesión $\{\eta_\alpha\}_{\alpha \in W}$ está en M .

Ahora bien, entonces podemos formar una sucesión creciente $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \omega_1}$ en W tomando $\alpha_\delta \in W$ mayor que todos los α_ϵ y que todos los η_{α_ϵ} , para $\epsilon < \delta$, con lo que $p_{\alpha_\epsilon} \Vdash \check{p}_{\alpha_\delta} \notin \Gamma$. Como trivialmente $p_{\alpha_\delta} \Vdash \check{p}_{\alpha_\delta} \in \Gamma$, concluimos que los p_{α_ϵ} son incompatibles dos a dos, en contra de que \mathbb{P} cumple la c.c.n. ■

Teorema 9.39 *Si M es un modelo transitivo numerable de ZFC + ACA, T es un árbol de Suslin en M , \mathbb{P} es T con el orden opuesto y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , entonces en $M[G]$ se sigue cumpliendo ACA.*

DEMOSTRACIÓN: Del teorema 9.18 se sigue que $\mathcal{N}^{M[G]} = \mathcal{N}^M$, por lo que nos referiremos a este conjunto como \mathcal{N} , simplemente. Sea $X \in M[G]$, $X \subset \mathcal{N}$ y sea $C \in M[G]$ una coloración abierta en X . Fijemos una biyección $s : \omega \longrightarrow \omega^{<\omega}$ definida en M , que nos permite enumerar la base natural de \mathcal{N} :

$$B_n = B_{s(n)} = \{x \in \mathcal{N} \mid x|_{\mathcal{D}s(n)} = s(n)\}.$$

Notemos que B_n es el mismo en M o en $M[G]$. Podemos considerar la coloración como subconjunto $C \subset X \times X$, y entonces, que sea abierta quiere decir que existe $A \subset \omega \times \omega$ de modo que $C = \bigcup_{(m,n) \in A} (B_m \times B_n) \cap (X \times X)$. De nuevo por 9.18 tenemos que $A \in M$.

Sea $X = \xi_G$. Si X no contiene ningún subconjunto totalmente coloreado no numerable ni es unión numerable de subconjuntos totalmente no coloreados, podemos tomar una condición $p \in \mathbb{P}$ que fuerce que $\xi \subset \aleph_0$ y \check{A} codifica una coloración abierta en ξ respecto a la cual ξ no contiene ningún conjunto totalmente coloreado no numerable ni es unión numerable de subconjuntos totalmente no coloreados.

Sea $X_0 = \{x \in \aleph_0 \mid \forall q \in \mathbb{P}(q \leq p \wedge q \Vdash \check{x} \in \xi\}) \in M$. Al formar el conjunto A podemos exigir que la unión $\bigcup_{(m,n) \in A} (B_m \times B_n)$ sea simétrica, y desde luego no puede contener elementos de la diagonal de $X \times X$, luego A define en M una coloración abierta de X_0 . Vamos a ver que X_0 no es unión numerable de subconjuntos totalmente no coloreados.

En efecto, si $\{H_n\}_{n \in \omega}$ fuera tal colección, en $M[G]$ se cumple claramente que $X \subset X_0$, y cada H_n sigue siendo totalmente no coloreado en $M[G]$, luego $\{X \cap H_n\}_{n \in \omega}$ sería una descomposición de X en unión numerable de subconjuntos totalmente no coloreados.

Como en M se cumple ACA, existe $Y \subset X_0$ totalmente coloreado y no numerable. Podemos suponer que $Y = \{x_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ tiene cardinal \aleph_1 , concretamente. Para cada $\alpha < \omega_1$, existe $q_\alpha \in \mathbb{P}$ tal que $q_\alpha \leq p$ y $q_\alpha \Vdash \check{x}_\alpha \in \xi$, y podemos aplicar el teorema anterior a las condiciones $\{q_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$, lo que nos da un α tal que $q_\alpha \Vdash \{\beta < \omega_1 \mid \check{q}_\beta \in \Gamma\}$ es no numerable. Si G es un filtro genérico que contenga a q_α , tenemos que $\{\beta < \omega_1 \mid q_\beta \in G\}$ es no numerable en $M[G]$, pero si $q_\beta \in G$ entonces $x_\beta \in \xi_G$, luego $Y \cap \xi_G$ es no numerable en $M[G]$, y es un subconjunto totalmente coloreado, en contra de que p fuerza que no existe tal conjunto. ■

El único modelo de OCA que hemos construido es el del teorema 9.37, donde se cumple también AM y, por lo tanto, no hay árboles de Suslin a los que podamos aplicar el teorema anterior. Sin embargo, para remediar la situación basta eliminar de la prueba de 9.37 todo el esfuerzo que hemos hecho para garantizar AM:

Teorema 9.40 *Existe un modelo transitivo numerable de OCA + \neg HS.*

DEMOSTRACIÓN: Consideramos una iteración $(\{\mathbb{P}_\alpha\}_{\alpha \leq \omega_2}, \{\pi_\alpha\}_{\alpha < \omega_2})$ con soportes finitos similar a la considerada en la demostración del teorema 9.37, pero sin distinguir entre ordinales pares e impares, de modo que para todo $\alpha < \omega_2$ se cumpla que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \pi_\alpha = \omega_1 \text{ y } \pi_\alpha \text{ es isomorfo a un c.p.o. de los construidos en 9.35.}$$

Es pura rutina comprobar que la prueba se simplifica para llegar igualmente a que en $M[G]$ se cumple OCA + $2^{\aleph_0} = \aleph_2$. En particular, en todas las extensiones

intermedias de la iteración se sigue cumpliendo la hipótesis del continuo. En la prueba suponemos que en M se cumple un diamante, con lo que en particular se cumple \Diamond y, por lo tanto, existe un árbol de Suslin $T \in M$. Vamos a probar que T sigue siendo un árbol de Suslin en todas las extensiones intermedias, y en particular en la última, de modo que en $M[G]$ se cumple $\neg\text{HS}$.

Como los cardinales se conservan en todas las extensiones intermedias, T es en todas ellas un \aleph_1 -árbol. Además podemos tomarlo ramificado, y esta propiedad se conserva trivialmente, con lo que [TC 9.16] implica que basta probar que las anticadenas de T siguen siendo numerables en todas las extensiones. Equivalentemente, si llamamos \mathbb{P}_T a T con el orden inverso, basta probar que el c.p.o. \mathbb{P}_T cumple la c.c.n. en todas las extensiones intermedias.

Supongamos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \check{T}$ es un árbol de Suslin. Para probar que lo mismo vale para $\alpha + 1$ tomamos un filtro genérico $G_{\alpha+1}$ y usamos la factorización $M[G_{\alpha+1}] = M[G_\alpha][H]$, donde H es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G_\alpha]$, siendo $\mathbb{Q} \in M[G_\alpha]$ un c.p.o. de los construidos en el teorema 9.35. Tenemos que T es un árbol de Suslin en $M[G_\alpha]$, luego todo se reduce a demostrar que

$$\mathbb{1}_\mathbb{Q} \Vdash \check{T} \text{ cumple la c.c.n.}$$

Ahora aplicamos un truco, y es que por el teorema 8.42 esto es equivalente a probar que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_T} \Vdash \check{\mathbb{Q}} \text{ cumple la c.c.n.}$$

Para ello sea K un filtro \mathbb{P}_T -genérico sobre $M[G_\alpha]$, y tenemos que probar que \mathbb{Q} cumple la c.c.n. en $M[G_\alpha][K]$. Observemos que esta extensión genérica tiene los mismos cardinales que el modelo base, y cumple igualmente HC.

Notemos que \mathbb{Q} está construido en $M[G_\alpha]$ a partir de un espacio topológico X y una coloración abierta C . En $M[G_\alpha]$ se cumple que X no es unión numerable de cerrados totalmente no coloreados, y esto sigue siendo cierto en $M[G_\alpha][K]$. Esto se debe a que cada cerrado puede codificarse con un cierto $A \subset \omega$ (enumeramos en $M[G_\alpha]$ una base de X y tomamos como A el conjunto de los abiertos básicos contenidos completamente en el complementario del cerrado), luego una familia numerable de cerrados puede codificarse con un conjunto $F \subset \omega \times \omega$, que estaría en $M[G_\alpha]$ por el teorema 9.18, y permitiría recuperar en el modelo base la familia numerable de cerrados totalmente no coloreados.

Ahora todo se reduce a comprobar que la construcción del teorema 9.35 es absoluta, de modo que si construimos en $M[G_\alpha][K]$ el c.p.o. \mathbb{Q} asociado a X con la coloración C obtenemos precisamente el \mathbb{Q} que ya tenemos, luego éste también cumple la c.c.n. en la extensión.

Veamos ahora que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\lambda} \Vdash \mathbb{P}_T$ cumple la c.c.n. admitiendo que esto se cumple para todo $\delta < \lambda$. Nuevamente, por el teorema 8.42 basta probar que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_T} \Vdash \mathbb{P}_\lambda$ cumple la c.c.n., y sabemos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_T} \Vdash \mathbb{P}_\delta$ cumple la c.c.n., para todo $\delta < \lambda$.

Sea K un filtro \mathbb{P}_T -genérico sobre M . Basta tener en cuenta que en $M[K]$ seguimos teniendo una iteración $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \lambda}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \lambda})$ con soportes finitos en la

que cada \mathbb{P}_δ cumple la c.c.n., y basta aplicar en $M[K]$ el razonamiento empleado para el caso límite en la prueba del teorema 8.26. ■

Así pues, ACA es consistente tanto con AM como con su negación. Si combinamos el teorema anterior con 9.39 y 9.17 obtenemos que ACA es consistente con $\mathbf{t} = \aleph_1$ (y también con $\mathbf{t} = \aleph_2$, que es el valor que toma en el modelo en que se cumple $\text{ACA+AM+c} = \aleph_2$).

Para terminar esta sección mostramos que la restricción de ACA a coloraciones abiertas es necesaria, puesto que en ZFC podemos probar que existen coloraciones (no abiertas) para las que la conclusión que da ACA es falsa.

Teorema 9.41 *Existe una coloración abierta C de $X = \mathcal{N}$ tal que X no contiene ningún subconjunto no numerable totalmente no coloreado ni puede expresarse como unión numerable de conjuntos totalmente coloreados.*

DEMOSTRACIÓN: Para cada $f \in \mathcal{N}$ vamos a definir una sucesión $\{f_i\}_{i \in \omega}$ en \mathcal{N} . Concretamente, hacemos

$$f_i|_i = f|_i, \quad f_i(i+j) = f(2^{i+1}(2i+2j+1)).$$

Notemos que la sucesión $\{f_i\}_{i \in \omega}$ converge a f . Esto significa que si tomamos un abierto básico que contenga a f , que será de la forma $B_{f|_n}$, para cierto $n \in \omega$, se cumple que $f_i \in B_{f|_n}$ para todo $n \geq i$.

Definimos una coloración C mediante $\{f, g\} \in C$ si y sólo si $f \neq g$ y $f \neq g_i$, $g \neq f_i$ para todo $i \in \omega$.

La coloración es abierta. Esto significa que si $(f, g) \in C$ (viendo ahora a C como subconjunto de $\mathcal{N} \times \mathcal{N}$), existe un producto de abiertos básicos que cumplen $(f, g) \in B_{f|_m} \times B_{g|_m} \subset C$. En otras palabras, se trata de probar que existe un $m \in \omega$ tal que, para todo par $(f', g') \in \mathcal{N}$ tal que $f'|_m = f|_m$ y $g'|_m = g|_m$, se cumple que $(f', g') \in C$, o que si $(f, g) \in C$, sólo necesitamos conocer una parte finita $(f|_m, g|_m)$ de las sucesiones para comprobar que así sucede.

Sea $m_0 \in \omega$ tal que $f(m_0) \neq g(m_0)$. Entonces, para todo $i > m_0$ tenemos que $f_i(m_0) = f(m_0) \neq g(m_0)$ y $g_i(m_0) = g(m_0) \neq f(m_0)$, luego se cumple $f_i \neq g$ y $g_i \neq f$, y lo mismo pasará con cualquier par de funciones (f', g') tales que $f'|_{m_0+1} = f|_{m_0+1}$, $g'|_{m_0+1} = g|_{m_0+1}$.

Por otro lado, para comprobar que $f_i \neq g$ y $g_i \neq f$ para $i \leq m_0$, sólo tenemos que evaluar las cuatro funciones en un número finito de puntos, y para evaluar las f_i y las g_i en dicho número finito de puntos, sólo necesitamos conocer f y g en un número finito de puntos, luego es claro que podemos tomar un $m > m_0$ de modo que si $f'|_m = f|_m$ y $g'|_m = g|_m$ entonces se cumplirá igualmente que $f'_i \neq g'_i$, $g'_i \neq f'_i$, para todo $i \leq m_0$ por una parte, y para todo $i > m_0$ por la parte vista antes. Por lo tanto $(f', g') \in C$.

Veamos ahora que no existen conjuntos totalmente no coloreados no numerables. Sea $Y \subset \mathcal{N}$ un subconjunto no numerable y sea $D \subset Y$ un subconjunto

denso numerable. Sea $D^* = \{f_i \mid f \in D \wedge i \in \omega\}$. Como D^* es numerable, podemos tomar $g \in Y \setminus D^*$ y a su vez un $h \in Y$ tal que $h \neq g$ y $h \neq g_i$ para todo $i \in \omega$. Sean U_g y U_h entornos disjuntos de g y h , respectivamente. Como la sucesión g_i converge a g , todos sus términos salvo un número finito de ellos están en U_g , luego restringiendo U_h si es preciso podemos suponer que $g_i \notin U_h$ para todo $i \in \omega$. Como D es denso en Y y $h \in Y \cap U_h \neq \emptyset$, existe $f \in D \cap U_h$. Entonces $f_i \neq g$ para todo $i \in \omega$ porque $g \notin D^*$, y $g_i \neq f$ para todo $i \in \omega$ porque $g_i \notin U_h$. Por lo tanto $\{f, g\} \in C$.

Por último veamos que \mathbb{N} no es unión numerable de conjuntos totalmente coloreados. Sea $\{H_n\}_{n < \omega}$ una sucesión de conjuntos totalmente coloreados y vamos a definir una $f \in \mathbb{N}$ que no pertenezca a ninguno de ellos.

Hacemos $f(2n + 1) = 0$ para todo $n \in \omega$. Vamos a definir recurrentemente los valores $f(2i)$ al mismo tiempo que una sucesión $\{f^i\}_{i \in \omega}$ de elementos de \mathbb{N} .

Supongamos definida $f|_{2l}$ y las funciones $\{f^i\}_{i < l}$. Si $2l = 2^{i+1}(2i + 2j + 1)$, para ciertos $i < l$ y $j \in \omega$, claramente únicos, definimos $f(2l) = f^i(i + j)$. En caso contrario tomamos $f(2l)$ el menor número mayor que $f^i(2l)$ para todo $i < l$.

Si existe $g \in H_l$ tal que $g|_l = f|_l$, definimos $f^l = g$, y en caso contrario definimos f^l como cualquier función que extienda a $f|_l$.

Ahora observamos que las funciones f^i que hemos construido son precisamente las funciones f_i asociadas a f . En efecto, fijado un $l \in \omega$, tenemos que $f|_l = f^l|_l = f^l|_l$, donde la primera igualdad es por la definición de f_l y la segunda por la construcción de f^l , que se toma en cualquier caso como una extensión de $f|_l$. Por otra parte,

$$f_l(l + j) = f(2^{l+1}(2l + 2j + 1)) = f^l(l + j).$$

No puede ocurrir que f esté en ningún H_l , pues en tal caso, existe $g \in H_l$ tal que $g|_l = f|_l$ (sirve $g = f$, pero no podemos asegurar que en la construcción hayamos elegido precisamente f), con lo que también $f_l \in H_l$. Pero no puede ser $f = f_l$, porque tomando $2l' = 2^{i+1} > 2l$, por construcción $f(2l') > f_l(2l')$. Así pues, como H_l está totalmente coloreado, tiene que ser $\{f, f_l\} \in C$, lo cual contradice la definición de la coloración. ■

Así, en ACA no podemos intercambiar “totalmente coloreado” por “totalmente no coloreado” sin que el axioma se vuelva contradictorio. Si en el ejemplo anterior cambiamos la coloración por su opuesta (es decir, consideramos pares coloreados a los que en el ejemplo anterior son no coloreados y viceversa), tenemos un ejemplo de coloración cerrada (en $(\mathbb{N} \times \mathbb{N}) \setminus \Delta_{\mathbb{N}}$) que no cumple ACA.

9.5 Aplicaciones del axioma de las coloraciones abiertas

Como primera aplicación de ACA vamos a ver que implica que no existen más huecos que los que hemos demostrado que existen en ZFC:

Teorema 9.42 (ACA) Si $\kappa \geq \aleph_2$ y $\mu \geq \aleph_1$ son cardinales regulares, entonces no existen huecos de tipo (κ, μ) .

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que $(\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}, \{g_\beta\}_{\beta < \mu})$ es un hueco en ${}^\omega\omega$. Como $f_\alpha <^* f_{\alpha+1} \leq^* g_{\beta+1} <^* g_\beta$, existe un mínimo número natural $n_{\alpha\beta}$ tal que $f_\alpha|_{\omega \setminus n_{\alpha\beta}} < g_\beta|_{\omega \setminus n_{\alpha\beta}}$. Para cada $\alpha < \kappa$ existe un n_α tal que $\{\beta < \mu \mid n_{\alpha\beta} = n_\alpha\}$ tiene cardinal μ , y a su vez, existe un $n \in \omega$ tal que $\{\alpha < \kappa \mid n_\alpha = n\}$ tiene cardinal κ . Tomando una sucesión cofinal creciente en este conjunto y formando la subsucesión correspondiente de $\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$, podemos pasar a otro hueco tal que $n_\alpha = n$ para todo $\alpha < \kappa$. Más aún, definiendo

$$f'_\alpha(m) = f_\alpha(n+m), \quad g'_\beta(m) = g_\beta(n+m)$$

podemos suponer sin pérdida de generalidad que $n = 0$, en otras palabras, que, para cada $\alpha < \kappa$, el conjunto

$$S_\alpha = \{\beta < \mu \mid f_\alpha < g_\beta\}$$

tiene cardinal μ . Sea

$$X = \{(f_\alpha, g_\beta) \mid \alpha < \kappa \wedge \beta \in S_\alpha\} \subset \mathbb{N}^2,$$

y sea

$$C = \{\{(f, g), (f', g')\} \in [X]^2 \mid \forall k \in \omega (f(k) > g'(k) \vee f'(k) > g(k))\}.$$

Claramente es una coloración abierta en X (pues si un par esta en C y otro par coincide con el dado hasta un natural suficientemente grande (hasta $k+1$), entonces también está en C). Vamos a probar que contradice a ACA.

Supongamos que $X = \bigcup_{n \in \omega} H_n$, donde cada H_n es totalmente no coloreado. Para cada $\alpha < \kappa$ y cada $\beta \in S_\alpha$, sea $n_{\alpha\beta}$ tal que $(f_\alpha, g_\beta) \in H_{n_{\alpha\beta}}$. Para cada α , existe un n_α tal que $T_\alpha = \{\beta \in S_\alpha \mid n_{\alpha\beta} = n_\alpha\}$ tiene cardinal μ , y a su vez existe un n tal que $A = \{\alpha < \kappa \mid n_\alpha = n\}$ tiene cardinal κ .

En definitiva, tenemos que $|A| = \kappa$, para cada $\alpha \in A$ el conjunto T_α tiene cardinal μ y $\{(f_\alpha, g_\beta) \mid \alpha \in A \wedge \beta \in T_\alpha\} \subset H_n$.

Fijemos $\alpha' \in A$ y $B = T_{\alpha'}$. Así A es cofinal en κ y B es cofinal en μ . Además, si $\alpha \in A$ y $\beta \in B$, tomamos $\beta' \in T_\alpha$, de modo que $(f_\alpha, g_{\beta'})$, $(f_{\alpha'}, g_\beta) \in H_n$, y esto implica que $f_\alpha \leq g_\beta$.

Por consiguiente, si definimos $g(k) = \min_{\beta \in B} g_\beta(k)$, se cumple

$$\bigwedge \alpha \in A \bigwedge \beta \in B \quad f_\alpha \leq g \leq g_\beta,$$

luego $\bigwedge \alpha < \kappa \bigwedge \beta < \mu \quad f_\alpha \leq^* g \leq^* g_\beta$, en contradicción con que la sección de partida era un hueco.

Supongamos ahora que existe $Y \subset X$ no numerable totalmente coloreado. Si (f_α, g_β) , $(f_{\alpha'}, g_{\beta'}) \in Y$ son pares distintos, entonces existe un k tal que

$f_\alpha(k) > g_{\beta'}(k)$ o bien $f_{\alpha'}(k) > g_\beta(k)$. Supongamos el primer caso, pues con el segundo se razona igual. La conclusión es que $\alpha \neq \alpha'$ y $\beta \neq \beta'$, pues si fuera $\alpha = \alpha'$ tendríamos que $f_{\alpha'}(k) > g_{\beta'}(k)$, en contra de que $\beta' \in S_{\alpha'}$, y si fuera $\beta = \beta'$ entonces $f_\alpha(k) > g_\beta(k)$, que es igualmente contradictorio.

Esto nos permite construir sucesiones estrictamente crecientes $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \omega_1}$, $\{\beta_\delta\}_{\delta < \omega_1}$ tales que $\{(f_{\alpha_\delta}, g_{\beta_\delta}) \mid \delta < \omega_1\} \subset Y$. En efecto, puesto que el conjunto $A = \{\alpha < \kappa \mid \forall \beta < \mu (f_\alpha, g_\beta) \in Y\}$ es no numerable, reduciendo Y podemos suponer que tiene ordinal ω_1 , y volviendo a reducir Y podemos suponer que lo mismo vale para $B = \{\beta < \mu \mid \forall \alpha < \kappa (f_\alpha, g_\beta) \in Y\}$. Entonces, supuesta construida $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \gamma}$, $\{\beta_\delta\}_{\delta < \gamma}$, sean α^* y β^* sus supremos respectivos. Entonces, el conjunto

$$\{(f_\alpha, g_\beta) \in Y \mid \alpha \leq \alpha^*\} \cup \{(f_\alpha, g_\beta) \in Y \mid \beta \leq \beta^*\}$$

es numerable pues hemos visto que $(f_\alpha, f_\beta) \mapsto \alpha$ y $(f_\alpha, f_\beta) \mapsto \beta$ son inyectivas, luego existe un $(f_{\alpha_\gamma}, g_{\beta_\gamma}) \in Y$ que no está en dicho conjunto, de modo que $\{\alpha_\delta\}_{\delta \leq \gamma}$, $\{\beta_\delta\}_{\delta \leq \gamma}$ son estrictamente crecientes.

Como $\kappa > \aleph_1$, existe $\alpha < \kappa$ tal que $\alpha > \sup_{\delta < \omega_1} \alpha_\delta$. Llamamos $h = f_\alpha$. Así $f_{\alpha_\delta} \leq^* h \leq^* g_{\beta_\delta}$. Sea $n_\delta \in \omega$ tal que $f_{\alpha_\delta}|_{\omega \setminus n_\delta} \leq h|_{\omega \setminus n_\delta} \leq g_{\beta_\delta}|_{\omega \setminus n_\delta}$. Cambiando la sucesión $\{\alpha_\delta\}_{\delta < \omega_1}$ por una subsucesión cofinal, podemos suponer que existe un $n \in \omega$ tal que $n_\delta = n$ para todo $\delta < \omega_1$. Así, $f_{\alpha_\delta}|_{\omega \setminus n} \leq h|_{\omega \setminus n} \leq g_{\beta_\delta}|_{\omega \setminus n}$. Como hay una cantidad numerable de pares $(f_{\alpha_\delta}|_n, g_{\beta_\delta}|_n)$, restringiendo más la sucesión podemos suponer que todos son el mismo par (s, t) , y así resulta que $f_{\alpha_\delta} \leq h \leq g_{\beta_\delta}$.

Pero entonces, si $\delta, \epsilon < \omega_1$ son distintos, tenemos que $f_{\alpha_\delta} \leq h \leq g_{\beta_\epsilon}$, y también $f_{\alpha_\epsilon} \leq h \leq g_{\beta_\delta}$, pero por otra parte $(f_{\alpha_\delta}, g_{\beta_\delta}), (f_{\alpha_\epsilon}, g_{\beta_\epsilon}) \in Y$, que es totalmente coloreado, y esto implica que existe un k tal que $f_{\alpha_\delta}(k) > g_{\beta_\epsilon}(k)$ o bien $f_{\alpha_\epsilon}(k) > g_{\beta_\delta}(k)$, con lo que tenemos una contradicción. ■

Así pues, bajo ACA, los únicos huecos posibles son los de tipo (\aleph_1, \aleph_1) y los de tipo (\aleph_0, κ) , con $\kappa \geq b$. Más aún, el teorema 9.27 nos da:

Teorema 9.43 (ACA) $b \leq \aleph_2$.

DEMOSTRACIÓN: Si fuera $\aleph_2 > b$, por el teorema 9.27 existiría un hueco de tipo (\aleph_2, κ) , para cierto $\kappa \geq \aleph_1$, en contradicción con el teorema anterior.

Vamos a probar que en realidad ACA implica que $b = \aleph_2$. Para ello necesitamos algunos resultados previos.

Teorema 9.44 (ACA) *Todo subconjunto no numerable de $\mathcal{P}\omega$ contiene una cadena no numerable o bien una anticadena (en el sentido de conjuntos no comparables dos a dos por la inclusión) no numerable.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $A \subset \mathcal{P}\omega$ no numerable, y sea $X \subset \mathbb{N}$ el conjunto formado por las funciones características de los elementos de A . Definimos en

X la coloración C formada por los pares de funciones características de conjuntos incomparables respecto de la inclusión.

Se trata de una coloración abierta, pues si $(f, g) \in C$, existen $i, j \in \omega$ tales que $f(i) = g(j) = 0$ y $f(j) = g(i) = 1$, y si $n > i, j$, todo par $(f', g') \in X \times X$ de funciones que cumplan $f'|_n = f|_n$, $g'|_n = g|_n$ cumplirá lo mismo, luego $(f', g') \in C$.

Si X tiene un subconjunto no numerable completamente coloreado, entonces sus elementos se corresponden con una anticadena no numerable en A . Si X es unión numerable de conjuntos totalmente no coloreados, al menos uno de ellos será no numerable, y se corresponderá con una cadena en A . ■

Teorema 9.45 *Sea κ un cardinal y $\{f_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$ una sucesión en ${}^\omega\omega$ tal que:*

- a) *Cada $f_\alpha : \omega \rightarrow \omega$ es creciente.*
- b) *La sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha \in \omega}$ es estrictamente creciente en el sentido de que si $\alpha < \beta$ entonces $f_\alpha \leq^* f_\beta$ y $f_\alpha \neq^* f_\beta$.*
- c) *La sucesión no está acotada en ${}^\omega\omega$.*

Entonces para cada $A \subset [\kappa]^\kappa$ existen $\alpha, \beta \in I$ tales que $\alpha < \beta$ y $f_\alpha \leq f_\beta$.

DEMOSTRACIÓN: Sea $g : \kappa \rightarrow A$ la única semejanza en su ordinal. Entonces la sucesión $\{f_{g(\alpha)}\}_{\alpha < \kappa}$ cumple las condiciones del enunciado, y si probamos el teorema para ella con $A = \kappa$, se cumple también para el conjunto A dado. Así pues, no perdemos generalidad si suponemos $A = \kappa$. Sea

$$S = \{s \in {}^\omega\omega \mid \forall \alpha < \kappa \ s \subset f_\alpha\}.$$

Para cada $s \in S$ sea $\alpha_s = \min\{\alpha < \kappa \mid s \subset f_\alpha\}$ y $\beta_0 = \sup\{\alpha_s \mid s \in S\}$. Como $\text{cf } \kappa \geq \aleph_0 \geq \aleph_1$ y S es numerable, concluimos que $\beta_0 < \kappa$. Observemos que $f_{\alpha_s} \leq^* f_{\beta_0}$ para todo $s \in S$. Sea $\phi : \kappa \setminus \beta_0 \rightarrow \omega$ tal que para todo $\alpha \in \kappa \setminus \beta_0$ se cumpla

$$f_{\beta_0}|_{\omega \setminus \phi(\alpha)} \leq f_\alpha|_{\omega \setminus \phi(\alpha)}.$$

Usando de nuevo que la cofinalidad de κ no es numerable, existe un $n_0 \in \omega$ y $X_0 \subset \kappa$ cofinal de modo que $\phi[X_0] = \{n_0\}$. Podemos partir X_0 en un número finito de subconjuntos según el valor de $f_\alpha|_{n_0}$, para cada $\alpha \in X_0$. Alguno de estos subconjuntos de X_0 será cofinal en κ , luego restringiendo X_0 podemos suponer que $f_\alpha|_{n_0} = s_0$, para un mismo $s_0 \in {}^{n_0}\omega$ independiente de α . Notemos que la sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha \in X_0}$ sigue siendo no acotada.

Veamos ahora que $\forall n \in \omega \wedge \alpha < \kappa \wedge m \in \omega \forall \beta \in X_0 (\alpha \leq \beta \wedge f_\beta(n) \geq m)$.

En caso contrario para cada $n \in \omega$ existen $\alpha_n < \kappa$ y $m_n \in \omega$ tales que

$$\forall \beta \in X_0 (\alpha_n \leq \beta \rightarrow f_\beta(n) < m_n).$$

Sea $\gamma = \sup_n \alpha_n < \kappa$, sea $f \in {}^\omega\omega$ definida por $f(n) = m_n$. Entonces, para cada $\beta \in {}^n X_0$ tal que $\gamma \leq \beta$ se cumple $f_\beta \leq f$, luego f acota a $\{f_\alpha\}_{\alpha \in X_0}$, contradicción.

Sea $n_1 \in \omega$ el menor natural que cumple

$$\bigwedge \alpha < \kappa \bigwedge m \in \omega \bigvee \beta \in X_0 (\alpha \leq \beta \wedge f_\beta(n_1) \geq m).$$

Como todas las funciones f_β con $\beta \in X_0$ cumplen que $f_\beta|_{n_0}$ es fijo, tiene que ser $n_0 \leq n_1$. La minimalidad de n_1 hace que $f_\beta(i)$ para $i < n_1$ esté acotado para β grande, es decir, existe un $\beta_1 \geq \beta_0$ y un $s_1 \in {}^{n_1}\omega$ de modo que

$$\bigwedge \beta \in X_0 (\beta_1 \leq \beta \rightarrow f_\beta|_{n_1} \leq s).$$

De nuevo podemos partir X_0 en un número finito de partes y quedarnos con una de ellas, $X_1 \subset X_0$, de modo que para todo $\beta \in X_1$ la restricción $f_\beta|_{n_1} = s_1$ sea un valor fijo independiente de β y el conjunto $\{f_\alpha(n_1) \mid \alpha \in X_1\}$ no esté acotado en ω . (Aquí usamos que sólo hay un número de funciones $s' \leq s$ en ${}^{n_1}\omega$.) Sea $n_1 \leq n_2$ tal que

$$f_{\alpha_{s_1}}|_{\omega \setminus n_2} \leq f_{\beta_0}|_{\omega \setminus n_2}.$$

Finalmente sea $\alpha^* \in X_1$ tal que $\beta_0 < \alpha^*$ y $f_{\alpha_{s_1}}(n_2) \leq f_{\alpha^*}(n_1)$. Veamos que $f_{\alpha_{s_1}} \leq f_{\alpha^*}$, lo cual concluirá la prueba.

Tomamos $n \in \omega$. Si $n < n_1$ entonces $f_{\alpha_{s_1}}(n) = s_1(n) = f_{\alpha^*}(n)$. Si, por el contrario, $n_1 \leq n < n_2$, entonces

$$f_{\alpha_{s_1}}(n) \leq f_{\alpha_{s_1}}(n_2) \leq f_{\alpha^*}(n_1) \leq f_{\alpha^*}(n).$$

Por último, si $n_2 \leq n$, entonces $f_{\alpha_{s_1}}(n) \leq f_{\beta_0}(n) \leq f_{\alpha^*}(n)$. ■

Como consecuencia:

Teorema 9.46 (ACA) $\mathfrak{b} = \aleph_2$.

DEMOSTRACIÓN: Ya sabemos que $\mathfrak{b} \leq \aleph_2$. Si no se da la igualdad existe una sucesión $\{f_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ no acotada en ${}^\omega\omega$, y la podemos modificar para que cumpla las condiciones del teorema anterior. En efecto, podemos definir una sucesión estrictamente creciente de funciones monótonas $\{g_\alpha\}_{\alpha < \omega_1}$ como sigue: supuesta definida $\{g_\alpha\}_{\alpha < \beta}$, con $\beta < \omega_1$, no puede ser no acotada, luego existe una función g_β que las acota a todas, y modificándola adecuadamente podemos hacer que sea creciente, que acote estrictamente a todas las funciones anteriores y de modo que además $f_\alpha \leq g_\alpha$. De este modo, la sucesión completa no está acotada, pues si lo estuviera también lo estaría la sucesión inicial.

Para cada $\alpha < \omega_1$ sea $x_\alpha = \{(n, m) \in \omega \times \omega \mid f_\alpha(n) \leq m\}$. Claramente, se trata de una sucesión estrictamente decreciente respecto de \subset^* . Vamos a probar que la familia $\{x_\alpha \mid \alpha < \omega_1\}$ no contiene ni cadenas ni anticadenas no numerables respecto de \subset , lo que contradice al teorema 9.44.

Sea $A \subset \omega_1$ no numerable. Entonces $\{x_\alpha \mid \alpha \in A\}$ no puede ser una cadena respecto de \subset , porque si $\alpha < \beta$, sabemos que $x_\beta \subset^* x_\alpha$ y $x_\beta \neq^* x_\alpha$, luego la única relación de inclusión que se puede dar entre x_α y x_β es $x_\beta \subset x_\alpha$. Por lo tanto, tendríamos que para todo $\alpha < \beta$ en A , se cumpliría $x_\beta \not\subseteq x_\alpha$, pero eso es imposible, porque tomando $u_\alpha \in x_\alpha \setminus x_{\alpha'}$, donde α' es el siguiente de α en A , tendríamos una cantidad no numerable de elementos de $\omega \times \omega$.

Por otra parte, el teorema anterior nos da $\alpha < \beta$ en A tales que $f_\alpha \leq f_\beta$, luego $x_\beta \subset x_\alpha$, luego $\{x_\alpha \mid \alpha \in A\}$ tampoco es una anticadena. ■

En particular $\text{ACA} \rightarrow \mathfrak{c} \geq \aleph_2$, luego el teorema 9.42 implica ahora que, bajo OCA, no existen huecos de tipo $(\mathfrak{c}, \mathfrak{c})$, ni de tipo (\mathfrak{c}, \aleph_1) . Como hemos demostrado que $\text{AM} + \text{ACA}$ es consistente, ahora podemos afirmar que AM no implica la existencia de huecos de estos tipos. Por otra parte,

$$\text{AM} + \text{ACA} \rightarrow \mathfrak{c} = \aleph_2,$$

pues $\mathfrak{c} = \mathfrak{b} = \aleph_2$, la primera igualdad por AM y la segunda por ACA . Los teoremas 9.17, 9.39 y 9.40 implican que ACA es consistente con $\mathfrak{t} = \aleph_1$ (y también con $\mathfrak{t} = \aleph_2$, que se sigue de $\text{AM} + \text{ACA}$, luego ACA no determina \mathfrak{t}). Es un problema abierto si ACA implica $\mathfrak{c} = \aleph_2$.

Terminamos la sección con una aplicación elemental de OCA. No es difícil probar que toda sucesión en \mathbb{R} contiene una subsucesión monótona. Una aplicación elemental del teorema anterior es la siguiente generalización de este hecho:

Teorema 9.47 (ACA) *Si $X \subset \mathbb{R}$ es un conjunto no numerable y $f : X \rightarrow \mathbb{R}$, entonces existe $Y \subset X$ no numerable tal que $f|_Y : Y \rightarrow \mathbb{R}$ es monótona.*

DEMOSTRACIÓN: Si existe un $a \in \mathbb{R}$ tal que $f^{-1}[\{a\}]$ es no numerable, basta tomar $Y = f^{-1}[\{a\}]$. En caso contrario $f[X]$ es no numerable, pues $X = \bigcup_{a \in f[X]} f^{-1}[\{a\}]$ y todos los conjuntos de la unión son numerables.

Por lo tanto, eligiendo una antiimagen de cada elemento de $f[X]$ podemos reducir X y suponer que f es inyectiva. Para cada $x \in X$ sea

$$q_x = \{y \in \mathbb{Q} \mid y \leq x\} \times \{z \in \mathbb{Q} \mid z \leq f(x)\}.$$

Sea $Z = \{q_x \mid x \in X\}$, que es un subconjunto no numerable de $\mathcal{P}(\mathbb{Q} \times \mathbb{Q})$. Es claro que el teorema anterior vale para subconjuntos no numerables de cualquier $\mathcal{P}U$, con U numerable, luego podemos concluir que Z tiene una cadena o una anticadena no numerable Z' . Sea $Y = \{x \in X \mid q_x \in Z'\}$, que es un subconjunto no numerable de X . Si Z' es una cadena, entonces $f|_Y$ es monótona creciente, mientras que si Z' es una anticadena entonces $f|_Y$ es monótona decreciente. ■

Capítulo X

Extensiones propias

En el capítulo VIII hemos demostrado la consistencia del axioma de Martin mediante una iteración con soportes finitos. Sin embargo, muchas pruebas de consistencia requieren considerar soportes numerables. Una de las razones que obligan a descartar los soportes finitos es que estas iteraciones añaden necesariamente subconjuntos de ω . Para entender por qué, vamos a considerar una iteración arbitraria $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \kappa}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \kappa})$ con soportes finitos, donde κ es un cardinal no numerable, y vamos a exigir únicamente una condición trivial, y es que existan dos sucesiones $\{\sigma_\delta\}_{\delta < \kappa}$, $\{\tau_\delta\}_{\delta < \kappa}$ tales que $\sigma_\delta, \tau_\delta \in \hat{\pi}_\delta$ y $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \sigma_\delta \perp \tau_\delta$, es decir, que cada c.p.o. de la iteración tenga al menos dos condiciones incompatibles.

Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, supongamos en M una iteración en las condiciones descritas y sea G un filtro \mathbb{P}_κ -genérico sobre M . Para cada $\alpha < \kappa$ consideramos $f \in {}^\omega 2$ dada por

$$f(n) = 1 \leftrightarrow \bigvee p \in G_{\alpha+\omega} p(n) = \sigma_{\alpha+n+1}.$$

Claramente $f \in M[G_{\alpha+\omega}]$. Vamos a probar que $f \notin M[G_\alpha]$. Por el teorema 8.31 tenemos que $M[G_{\alpha+\omega}]$ puede obtenerse a partir de $M[G_\alpha]$ mediante una iteración con soportes finitos $(\{\mathbb{P}'_\delta\}_{\delta \leq \omega}, \{\pi'_\delta\}_{\delta < \omega})$, que claramente seguirá cumpliendo la condición de no trivialidad que hemos impuesto. Así pues, no perdemos generalidad si suponemos que $\alpha = 0$.

Supongamos que $f \in M$ y sea

$$D = \{p \in \mathbb{P}_\omega \mid \bigvee n \in \omega (f(n) = 1 \wedge p(n) = \tau_n)\} \in M.$$

Vamos a probar que D es denso en \mathbb{P}_ω . Para ello probamos en primer lugar que f toma el valor 1 infinitas veces. En efecto, dado $m \in \omega$, consideramos el conjunto

$$E_m = \{p \in \mathbb{P}_\omega \mid \bigvee n > m p(n) = \sigma_n\} \in M.$$

Claramente es denso, pues si $q \in \mathbb{P}_\omega$ cumple $\text{sop } q \subset k$, basta tomar $n > k$ y $n > m$ y q puede extenderse a una condición q' que coincida con q salvo que

$q(n) = \sigma_n$. Entonces $q' \leq q$ y $q' \in E_m$. Esto implica que existe $p \in G_\omega \cap E_m$, lo que a su vez se traduce en que existe un $n > m$ tal que $f(n) = 1$.

Ahora pasamos a probar la densidad de D . Dada una condición $p \in \mathbb{P}_\omega$, tomamos un $n \in \omega$ tal que $f(n) = 1$ y $\text{sop } p \subset n$. Nuevamente, p puede extenderse a una condición $p' \leq p$ tal que $p'(n) = \tau_n$, con lo que $p' \in D$.

Por consiguiente, existe un $p \in D \cap G_\omega$, luego existe un $n \in \omega$ tal que $f(n) = 1$ y $p(n) = \tau_n$. Ahora bien, por otra parte, por definición de f , existe $q \in G_\omega$ tal que $q(n) = \sigma_n$. Ahora usamos que si $\mathbb{Q}_n = (\pi_n)_{G_n}$ y $H_n = \{p(n)_{G_n} \mid p \in G_{n+1}\}$, entonces H_n es un filtro \mathbb{Q}_n -genérico sobre $M[G_n]$, y tenemos una contradicción, pues $(\sigma_n)_{G_n}, (\tau_n)_{G_n} \in H_n$, pero ambas condiciones son incompatibles.

Así pues, volviendo al contexto general, resulta que $M[G_\kappa]$ contiene al menos κ subconjuntos de ω que no están en M . Hay que tener en cuenta que κ podría no ser un cardinal en $M[G_\kappa]$, pero, por ejemplo, ahora podemos afirmar que en una iteración de κ c.p.o.s con la c.c.n. y soportes finitos se cumple necesariamente $2^{\aleph_0} \geq \kappa$. En particular, si queremos obtener un modelo de ZFC en el que no haya árboles de Suslin destruyéndolos uno a uno, necesitamos como mínimo \aleph_2 pasos, luego si queremos que en el modelo resultante se cumpla la hipótesis del continuo, o bien renunciamos a la c.c.n. y nos las arreglamos para colapsar \aleph_2 durante el proceso, o bien renunciamos a los soportes finitos.

En el capítulo siguiente probaremos la consistencia de $\text{ZFC} + \text{HS} + 2^{\aleph_0} = \aleph_1$ mediante una iteración de longitud \aleph_2 con soportes numerables (que no colapsa ningún cardinal). Aquí nos dedicaremos a presentar la teoría de Shelah sobre extensiones propias, que no es sino una amplia gama de potentes resultados sobre iteraciones con soportes numerables. Básicamente se trata de definir varias propiedades que se conservan por iteraciones con soportes numerables $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \alpha}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \alpha})$ (en el sentido de que si cada π_δ las posee entonces cada \mathbb{P}_δ las posee también) y que implican propiedades deseadas para los c.p.o.s \mathbb{P}_δ , como condiciones de cadena, conservación de cardinales, etc. La más básica de todas ellas es la de ser un c.p.o. “propio”, que es la que estudiamos en primer lugar.

El lector puede, si lo desea, compaginar la lectura de este capítulo y el siguiente, analizando los ejemplos que se presentan allí a medida que estudia las propiedades que introducimos aquí.

10.1 Preórdenes propios

En lo sucesivo vamos a usar que, tal y como se explica en el apéndice A, podemos considerar extensiones genéricas de modelos transitivos numerables de ZF-AP , de modo que la relación \Vdash es definible en tales modelos. Más aún, también se explica allí que la relación $p \Vdash \phi$ puede definirse para fórmulas matemáticas $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$, de modo que “ $p \Vdash \phi$ ” es (metamatemáticamente) un término del que podemos probar que $(p \Vdash \phi) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{\text{tc}})$.

Recordemos que $H(\kappa)$ representa el conjunto de todos los conjuntos cuya clausura transitiva tiene cardinal menor que κ , y que si κ es un cardinal no

numerable entonces $H(\kappa)$ es un modelo de ZFC–AP. Vamos a mostrar que es posible hablar de extensiones genéricas de submodelos elementales de $H(\kappa)$ que nos llevarán al concepto de c.p.o. propio.

Observemos en primer lugar que si M es un modelo transitivo numerable de ZFC, κ es un cardinal regular no numerable ^{M} y $\mathbb{P} \in H(\kappa)^M$ un c.p.o., entonces todos los subconjuntos densos en \mathbb{P} que están en M están de hecho en $H(\kappa)^M$, por lo que un filtro G es \mathbb{P} -genérico sobre M si y sólo si es \mathbb{P} -genérico sobre $H(\kappa)^M$. Por consiguiente, podemos considerar tanto la extensión $M[G]$ como la extensión $H(\kappa)^M[G] \subset M[G]$. El teorema siguiente nos precisa la relación entre ambas:

Teorema 10.1 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea κ un cardinal regular no numerable ^{M} y sea $\mathbb{P} \in H(\kappa)^M$ un c.p.o. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M (luego sobre $H(\kappa)^M$). Entonces*

$$H(\kappa)^M[G] = H(\kappa)^{M[G]}, \quad H(\kappa)^{M[G]} \cap M = H(\kappa)^M.$$

DEMOSTRACIÓN: Observemos en primer lugar que $|\mathbb{P}| < \kappa$, luego \mathbb{P} tiene la c.c. κ en M , luego κ es un cardinal regular no numerable en $M[G]$.

Claramente $H(\kappa)^M \subset H(\kappa)^{M[G]}$, luego en particular $\mathbb{P} \in H(\kappa)^{M[G]}$ y, como $G \subset \mathbb{P}$, también $G \in H(\kappa)^{M[G]}$, luego concluimos que $H(\kappa)^M[G] \subset H(\kappa)^{M[G]}$.

Recíprocamente, si existiera $x \in H(\kappa)^{M[G]} \setminus H(\kappa)^M[G]$, podríamos tomarlo \in -minimal, de modo que $x \subset H(\kappa)^M[G]$. Sea $\mu = |x| < \kappa$, sea $f : \mu \rightarrow x$ biyectiva, $f \in M[G]$, sea $g \in M[G]$ tal que $g : \mu \rightarrow H(\kappa)^M \cap M^{\mathbb{P}}$ y para todo $\alpha \in \mu$ se cumple $f(\alpha) = g(\alpha)_G$.

Por el teorema 5.5 existe $\tilde{g} \in M$ tal que $\tilde{g} : \mu \rightarrow \mathcal{P}(H(\kappa)^M \cap M^{\mathbb{P}})$ de modo que, para todo $\alpha \in \mu$, se cumple $g(\alpha) \in \tilde{g}(\alpha)$ y $|\tilde{g}(\alpha)|^M < \kappa$. Sea $A = \bigcup_{\alpha < \mu} \tilde{g}(\alpha)$.

Así $A \in M$ es un conjunto de \mathbb{P} -nombres $A \subset H(\kappa)^M$ y $|A|^M < \kappa$.

Ahora tomamos $x = \xi_G$, con $\xi \in M^{\mathbb{P}}$ y definimos

$$\sigma = \{(\tau, p) \in A \times \mathbb{P} \mid p \Vdash \tau \in \xi\} \in H(\kappa)^M \cap M^{\mathbb{P}}.$$

Claramente $\sigma_G \subset x$ y, si $u \in x$, entonces $u = g(\alpha)_G$, para cierto $\alpha < \mu$, y $\tau = g(\alpha) \in G(\alpha) \subset A$. Por otra parte existe un $p \in G$ tal que $p \Vdash \tau \in \xi$, luego $(\tau, p) \in \sigma$ y $u = \tau_G \in \sigma_G$, luego $x = \sigma_G \in H(\kappa)^M[G]$, contradicción.

Claramente $H(\kappa)^M \subset H(\kappa)^{M[G]} \cap M$. Si $x \in H(\kappa)^{M[G]} \cap M$, llamemos $\mu = |\text{ct } x|^{M[G]} < \kappa$ y sea $g : \mu \rightarrow \text{ct } x$ biyectiva. De nuevo por 5.5 existe $\tilde{g} : \mu \rightarrow \mathcal{P}x$ tal que $\bigwedge \alpha \in \mu g(\alpha) \in \tilde{g}(\alpha)$ y $\bigwedge \alpha \in \mu |\tilde{g}(\alpha)|^M < \kappa$. El conjunto $A = \bigcup_{\alpha < \mu} \tilde{g}(\alpha) \in M$ cumple $|A|^M < \kappa$ y $\text{ct } x \subset A$, luego $x \in H(\kappa)^M$. ■

Para trabajar con estas extensiones conviene observar que se cumple la variante siguiente del teorema 4.61:

Teorema 10.2 Sea $\phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n)$ una fórmula cuyas variables libres estén entre las indicadas. Sea \mathbb{P} un c.p.o., $p \in \mathbb{P}$, $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{P}}$ y κ un cardinal regular no numerable. Entonces

$$p \Vdash \forall x \in H(\check{\kappa}) \phi(x, \sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow \forall \sigma \in V^{\mathbb{P}} \cap H(\kappa) p \Vdash \phi(\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_n).$$

DEMOSTRACIÓN: Una implicación es trivial, teniendo en cuenta que siempre se cumple la desigualdad $\text{rang}(\sigma_G) < \text{rang } \sigma$. Para la otra sirve la misma prueba de 4.61 con esta única modificación: en la definición del conjunto A cambiamos $\forall \sigma \in M^{\mathbb{P}}$ por $\forall \sigma \in H(\kappa)^M$, con lo que obtenemos $\{\sigma_q\}_{q \in A}$ en $H(\kappa)^M$, y así el nombre σ construido en 4.60 (allí se llama π) cumple $\sigma \in H(\kappa)^M$. La prueba vale igualmente sin más que comprobar que, cuando se aplica el teorema 4.59 h) a la hipótesis $p \Vdash \forall x \in H(\check{\kappa}) \phi(x)$, el nombre π puede tomarse en $H(\kappa)^M$. Esto se debe a que, por el teorema anterior, dado un filtro genérico G , todo $x \in H(\kappa)^{M[G]}$ es de la forma π_G con $\pi \in H(\kappa)^M$. ■

Ahora vamos a ver que podemos definir “extensiones genéricas” de submodelos elementales de los modelos $H(\kappa)$, no necesariamente transitivos. El hecho básico al respecto es el teorema siguiente:

Teorema 10.3 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea κ un cardinal regular no numerable M , sea $N \prec H(\kappa)^M$, sea $\mathbb{P} \in N$ un c.p.o. y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Llamamos

$$N[G] = \{\tau_G \mid \tau \in M^{\mathbb{P}} \cap N\}.$$

Entonces $N \subset N[G] \prec H(\kappa)^{M[G]}$.

DEMOSTRACIÓN: Si $x \in N \subset H(\kappa)^M$, entonces \check{x} es definible en $H(\kappa)^M$, luego $\check{x} \in N$, luego $x = \check{x}_G \in N[G]$. Además en el teorema anterior hemos visto que $N[G] \subset H(\kappa)^M[G] \subset H(\kappa)^{M[G]}$.

Para probar que $N[G]$ es un submodelo elemental, por [TC 11.22], basta fijar una fórmula $\phi(x, x_1, \dots, x_n)$ y $x_1, \dots, x_n \in N[G]$ y demostrar que

$$\begin{aligned} \forall x \in H(\kappa)^{M[G]} \quad H(\kappa)^{M[G]} &\models \phi[x, x_1, \dots, x_n] \rightarrow \\ \forall x \in N[G] \quad H(\kappa)^{M[G]} &\models \phi[x, x_1, \dots, x_n]. \end{aligned}$$

Sea $x_i = \tau_{iG}$, con $\tau_i \in N$. Trivialmente

$$(\mathbb{1} \Vdash \forall y(y \in H(\check{\kappa}) \wedge H(\check{\kappa}) \models \forall x \phi[\tau_1, \dots, \tau_n] \rightarrow H(\check{\kappa}) \models \phi[y, \tau_1, \dots, \tau_n])^M.$$

Por el teorema 10.2 existe $\sigma \in M^{\mathbb{P}} \cap H(\kappa)^M$ tal que

$$(\mathbb{1} \Vdash \sigma \in H(\check{\kappa}) \wedge H(\check{\kappa}) \models \forall x \phi[\tau_1, \dots, \tau_n] \rightarrow H(\check{\kappa}) \models \phi[\sigma, \tau_1, \dots, \tau_n])^M.$$

Entonces

$$H(\kappa)^M \models (\mathbb{1} \Vdash \forall x \phi[\tau_1, \dots, \tau_n] \rightarrow \phi[\sigma, \tau_1, \dots, \tau_n]). \quad (*)$$

En efecto, si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre $H(\kappa)^M$, también lo es sobre M y se cumple que

$$(H(\kappa) \models \forall x \phi[\tau_{1G}, \dots, \tau_{nG}] \rightarrow H(\kappa) \models \phi[\sigma_G, \tau_{1G}, \dots, \tau_{nG}])^{M[G]},$$

que equivale a

$$H(\kappa)^{M[G]} \models (\forall x \phi[\tau_{1G}, \dots, \tau_{nG}] \rightarrow \phi[\sigma_G, \tau_{1G}, \dots, \tau_{nG}]),$$

o también a

$$H(\kappa)^{M[G]} \models (\forall x \phi[\tau_{1G}, \dots, \tau_{nG}] \rightarrow \phi[\sigma_G, \tau_{1G}, \dots, \tau_{nG}]),$$

y por la versión A.8 del teorema fundamental esto implica (*), y por consiguiente

$$\forall \sigma \in H(\kappa)^M (H(\kappa)^M \models \sigma \in V^{\mathbb{P}} \wedge (\mathbb{1} \Vdash \forall x \phi[\tau_1, \dots, \tau_n] \rightarrow \phi[\sigma, \tau_1, \dots, \tau_n])).$$

Como $N \prec H(\kappa)^M$, podemos tomar $\sigma \in N$ que cumple lo mismo, es decir,

$$\sigma \in M^{\mathbb{P}} \cap N \wedge H(\kappa)^M \models (\mathbb{1} \Vdash \forall x \phi[\tau_1, \dots, \tau_n] \rightarrow \phi[\sigma, \tau_1, \dots, \tau_n]),$$

o también, invirtiendo el razonamiento por el que hemos llegado a (*),

$$\sigma \in M^{\mathbb{P}} \cap N \wedge \mathbb{1} \Vdash H(\check{\kappa}) \models \forall x \phi[\tau_1, \dots, \tau_n] \rightarrow H(\check{\kappa}) \models \phi[\sigma, \tau_1, \dots, \tau_n].$$

Y de nuevo por A.8, si

$$\forall x \in H(\kappa)^{M[G]} H(\kappa)^{M[G]} \models \phi(x, x_1, \dots, x_n),$$

también $H(\kappa)^{M[G]} \models \phi(\sigma_G, x_1, \dots, x_n)$, con $\sigma_G \in N[G]$. ■

Observaciones Los modelos $N[G]$ no son propiamente extensiones genéricas, pues ni siquiera son necesariamente modelos transitivos. Esto último se puede remediar considerando el colapso transitivo $\pi : N[G] \longrightarrow C$. Llamemos $\bar{N} = \pi[N] \subset C$, $\bar{\mathbb{P}} = \pi(\mathbb{P}) \in C$ y $\bar{G} = \pi(G) \in C$. Observemos que $\pi|_N : N \longrightarrow \bar{N}$ es el colapso transitivo de N . Como π es un isomorfismo de modelos, resulta que $\bar{\mathbb{P}}$ es un c.p.o.^C y, como “ser un c.p.o.” es absoluto para modelos transitivos, resulta que $\bar{\mathbb{P}}$ es un c.p.o. Similarmente, \bar{G} es un filtro en $\bar{\mathbb{P}}$.

Todo elemento de C es de la forma $\pi(\tau_G) = \pi(\tau)_{\bar{G}}$, donde τ es un \mathbb{P} -nombre en N , luego un \mathbb{P} -nombre^N, luego $\pi(\tau)$ es un $\bar{\mathbb{P}}$ -nombre^{bar{N}}, luego $\pi(\tau) \in \bar{N}^{\bar{\mathbb{P}}}$. Recíprocamente, todo elemento de $\bar{N}^{\bar{\mathbb{P}}}$ es de la forma $\pi(\tau)$, con $\tau \in V^{\mathbb{P}} \cap N$. Por lo tanto

$$C = \bar{N}[\bar{G}] = \{\tau_{\bar{G}} \mid \tau \in \bar{N}^{\bar{\mathbb{P}}}\}.$$

En conclusión, el colapso transitivo de un modelo $N[G]$ es de la forma $\bar{N}[\bar{G}]$, donde \bar{G} es un filtro en $\bar{\mathbb{P}}$, pero no es necesariamente cierto que sea un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} . ■

Definición 10.4 Sea N un modelo numerable de ZFC–AP, sea $\pi : N \longrightarrow \bar{N}$ su colapso transitivo, sea $\mathbb{P} \in N$ un c.p.o. y sea $\bar{\mathbb{P}} = \phi(\mathbb{P})$. Diremos que un filtro G en \mathbb{P} es (N, \mathbb{P}) -genérico si $\bar{G} = \pi[G \cap N]$ es un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} .

Si suponemos, más concretamente, que $N \prec H(\kappa)$, para cierto cardinal regular no numerable κ , entonces un subconjunto denso de $\bar{\mathbb{P}}$ que esté en \bar{N} es de la forma $\bar{D} = \phi(D)$, donde $D \in N$ es denso en \mathbb{P} , por lo que la genericidad de G equivale a que $\bar{D} \cap \bar{G} \neq \emptyset$ para todo posible D , o también a que $D \cap G \cap N \neq \emptyset$, es decir, no basta con que G corte a todo conjunto denso $D \in N$, sino que es necesario que la intersección de D con G pueda atestiguarse en N . Vamos a dar condiciones necesarias y suficientes para que esto suceda.

Definición 10.5 Si \mathbb{P} es un c.p.o. y $D \subset \mathbb{P}$, diremos que D es *predenso* (bajo $p \in \mathbb{P}$) si todo $q \in \mathbb{P}$ ($q \leq p$) es compatible con un elemento de D . Diremos que D es *abierto* si contiene a todas las extensiones de sus elementos.

Teorema 10.6 *Bajo las hipótesis del teorema anterior, las condiciones siguientes son equivalentes:*

- a) G es (N, \mathbb{P}) -genérico.
- b) $G \cap N$ corta a todo $D \in N$ que sea predenso (resp. denso, abierto denso) en \mathbb{P} .
- c) $N[G] \cap \Omega = N \cap \Omega$.
- d) $N[G] \cap M = N$.

DEMOSTRACIÓN: Claramente $b_p \Rightarrow b_d \Rightarrow b_a$, donde los subíndices indican la versión para predensos, densos y abiertos denso, respectivamente. Vamos a ver que $b_a \Rightarrow d \Rightarrow c \Rightarrow b_p$, con lo que tendremos las equivalencias entre todas ellas, y ya hemos visto que $a) \Leftrightarrow b_d$.

$b_p \Rightarrow d)$ Tomemos $x \in N[G] \cap M$. Entonces $x = \tau_G$, con $\tau \in M^{\mathbb{P}} \cap N$. Sea

$$D = \{p \in \mathbb{P} \mid p \Vdash \tau \notin \check{V} \vee \forall y p \Vdash \tau = \check{y}\}^M.$$

Claramente D es abierto denso en \mathbb{P} . Observemos ahora que

$$(p \Vdash \tau \notin \check{V})^M \leftrightarrow (p \Vdash \tau \notin \check{V})^{H(\kappa)^M}.$$

En efecto, como los filtros \mathbb{P} -genéricos sobre M son los mismos que los \mathbb{P} -genéricos sobre $H(\kappa)^M$, lo que hay que probar es que si H es uno de ellos y $p \in H$, entonces $\tau_H \notin M \leftrightarrow \tau_H \notin H(\kappa)^M$, y esto es cierto por el teorema 10.1, pues $\tau_H \in H(\kappa)^M[H]$.

Similarmente, si $(p \Vdash \tau = \check{y})^M$, para un $y \in M$, el teorema 10.1 implica que $y \in H(\kappa)^M$, y entonces

$$(p \Vdash \tau = \check{y})^M \leftrightarrow (p \Vdash \tau = \check{y})^{H(\kappa)^M}.$$

Esto implica que D es definible en $H(\kappa)^M$, y entonces el hecho de que N sea un submodelo elemental implica que $D \in N$. Por lo tanto a) (en su versión débil, para conjuntos densos) nos da que existe $p \in D \cap N \cap G$. Como $x = \tau_G \in M$, no puede ser que $p \Vdash \tau \notin \check{M}$, luego $(\bigvee y p \Vdash \tau = \check{y})^M$, y hemos visto que esto equivale a $(\bigvee y p \Vdash \tau = \check{y})^{H(\kappa)^M}$, y como $N \prec H(\kappa)$, de hecho $(\bigvee y p \Vdash \tau = \check{y})^N$, luego hay un $y \in N$ tal que $p \Vdash \tau = \check{y}$, pero entonces $y = \check{y}_G = \tau_G = x$, luego $x \in N$.

d) \Rightarrow c) es obvio.

c) $\Rightarrow b_p$) Sea $D \in N$ un conjunto predenso en \mathbb{P} , sea $\mu = |D|$. Como $D \in H(\kappa)$, existe $f \in H(\kappa)$ tal que $f : \mu \rightarrow D$ biyectiva, luego existe una $f \in N$ que cumple lo mismo.

Consideramos una anticadena maximal $A \subset \mathbb{P}$ de condiciones $r \in \mathbb{P}$ tales que existe un $\alpha_r < \mu$ de modo que $r \Vdash \check{\alpha}_r = \min\{\alpha < \check{\mu} \mid \check{f}(\alpha) \in \Gamma\}$. Notemos que existen condiciones que cumplen esto porque D corta a todo filtro genérico. Sea $\tau = \{(\check{\delta}, r) \mid r \in A \wedge \delta \in \alpha_r\} \in H(\kappa)$. Se cumple entonces que

$$(\mathbb{1} \Vdash \tau = \min\{\alpha < \check{\mu} \mid \check{f}(\alpha) \in \Gamma\})^M.$$

En efecto, si H es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , existe un $r \in A \cap H$, con lo que $\alpha_r = \min\{\alpha < \mu \mid f(\alpha) \in H\}$ y, por otra parte, $\tau_H = \{\delta \mid \delta \in \alpha_r\} = \alpha_r$.

Más aún, esto se cumple en $H(\kappa)$, y como $N \prec H(\kappa)$, existe $\tau \in N$ (no necesariamente el que hemos construido) tal que $\tau \in M^\mathbb{P}$ y

$$\mathbb{1} \Vdash \tau = \min\{\alpha < \check{\mu} \mid \check{f}(\alpha) \in \Gamma\}.$$

Entonces $\tau_G \in N[G] \cap \Omega = N \cap \Omega$ y $f(\tau_G) \in D \cap G$, pero como f y τ_G están en $N \prec H(\kappa)^M$, también $f(\tau_G) \in N$, luego $D \cap N \cap G \neq \emptyset$. ■

No todos los filtros genéricos cumplen estas condiciones. Introducimos ahora una condición suficiente para que esto suceda:

Definición 10.7 Sea κ un cardinal no numerable, sea $N \prec H(\kappa)$ y sea $\mathbb{P} \in N$ un c.p.o. Diremos que una condición $q \in \mathbb{P}$ es (N, \mathbb{P}) -genérica si para todo $D \in N$ predenso en \mathbb{P} se cumple que $D \cap N$ es predenso bajo q .

Equivalentemente, en las condiciones de los teoremas anteriores, q es (N, \mathbb{P}) -genérica si y sólo si todo filtro \mathbb{P} -genérico sobre M que cumpla $q \in G$ es (N, \mathbb{P}) -genérico.

En efecto, si q es (N, \mathbb{P}) -genérica, $q \in G$ y $D \in N$ es predenso en \mathbb{P} , entonces $D \cap N$ es predenso bajo q , luego por 4.18 se cumple que $D \cap N \cap G \neq \emptyset$. Recíprocamente, si todo filtro genérico tal que $q \in G$ es (N, \mathbb{P}) -genérico y $D \in N$ es predenso, si $D \cap N$ no fuera predenso bajo q existiría un $p \leq q$ incompatible con $D \cap N$. Tomamos un filtro genérico G tal que $p \in G$ y entonces a) nos da un $r \in D \cap N \cap G$, con lo que $\neg r \perp p$, contradicción.

Nota Como consecuencia de la observación precedente, dado que el apartado a) del teorema es equivalente para conjuntos predensos o abiertos densos (luego también para densos), concluimos que, en las condiciones de la definición, q es (N, \mathbb{P}) -genérica si y sólo si para todo $D \in N$ abierto denso (o meramente denso) se cumple que $D \cap N$ es predenso bajo q . ■

Veamos otras equivalencias:

Teorema 10.8 *Sea κ un cardinal regular no numerable, sea $N \prec H(\kappa)$, sea $\mathbb{P} \in N$ un c.p.o. y sea $q \in \mathbb{P}$. Las afirmaciones siguientes son equivalentes:*

- a) q es (N, \mathbb{P}) -genérica.
- b) Si un conjunto $D \in N$ es predenso (resp. abierto denso) en \mathbb{P} entonces $q \Vdash \check{D} \cap \check{N} \cap \Gamma \neq \emptyset$.
- c) $q \Vdash \check{N}[\Gamma] \cap \check{V} = \check{N}$.
- d) $q \Vdash \check{N}[\Gamma] \cap \Omega = \check{N} \cap \Omega$.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar el teorema relativizado a un modelo transitivo numerable M . Ya hemos visto que a) equivale a que todos los filtros \mathbb{P} -genéricos sobre M que cumplen $q \in G$ satisfacen las condiciones del teorema anterior, y es claro que cada una de las condiciones a), b), c) del teorema anterior (para filtros que contienen a q) equivale a la condición b), c), d), respectivamente, del teorema que nos ocupa. ■

De este modo, una condición suficiente para que, al colapsar un modelo de la forma $N[G]$, el filtro \bar{G} sea $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} es que G contenga una condición (N, \mathbb{P}) -genérica. Esto nos lleva al concepto central de este capítulo:

Definición 10.9 Diremos que un c.p.o. \mathbb{P} es *propio* si para todo cardinal regular $\kappa > 2^{|\mathbb{P}|}$, para todo submodelo elemental numerable $N \prec H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P} \in N$ y para toda condición $p \in \mathbb{P} \cap N$ existe una condición $q \leq p$ que es (N, \mathbb{P}) -genérica.

Teorema 10.10 *Todos los c.p.o.s con la c.c.n. o \aleph_1 -cerrados son propios.*

DEMOSTRACIÓN: Si \mathbb{P} cumple la c.c.n., $\kappa > 2^{|\mathbb{P}|}$ regular y $\mathbb{P} \in N \prec H(\kappa)$, basta observar que $\mathbf{1} \Vdash \check{N}[\Gamma] \cap \Omega = \check{N} \cap \Omega$, pues esto implica que toda condición $q \in \mathbb{P}$ es (N, \mathbb{P}) -genérica. A su vez, basta probar la relativización de este hecho a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Fijamos un filtro genérico G y tomamos un $\alpha \in N[G] \cap \Omega$, de modo que $\alpha = \tau_G$ con $\tau \in N^{\mathbb{P}}$. Entonces $\alpha \in M[G] \cap \Omega = M \cap \Omega$, luego $\alpha \in M$. Más aún, por el teorema 10.1 sabemos que $\alpha \in H(\kappa)^M[G] \cap M = H(\kappa)^M$.

Sea $A \in M$ una anticadena maximal de condiciones $p \in \mathbb{P}$ que cumplen $(\forall \alpha \in H(\kappa) \ p \Vdash \tau = \check{\alpha})^M$. Como \mathbb{P} cumple la c.c.n. M tenemos que A es numerable M , luego $A \in H(\kappa)^M$ y como sus propiedades son definibles en $H(\kappa)^M$ podemos tomar $A \in N$. Más aún, como existe $f \in H(\kappa)$ tal que $f : \omega \rightarrow A$ biyectiva, podemos tomar $f \in N$ y, como $\omega \subset N$, concluimos que $A \subset N$.

Para cada $p \in A$ sea $\alpha_p \in H(\kappa)^M$ el único ordinal que cumple $p \Vdash \tau = \check{\alpha}_p$. El mismo razonamiento anterior nos da que $B = \{\alpha_p \mid p \in A\} \subset N$, y es claro que $\mathbf{1} \Vdash \tau \in \check{B}$, luego en particular $\mathbf{1} \Vdash \tau \in \check{N}$, luego, para el filtro genérico que habíamos considerado, se cumple que $\alpha = \tau_G \in N$, como había que probar.

Supongamos ahora que \mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado y fijemos igualmente $\kappa > 2^{|\mathbb{P}|}$ regular y $\mathbb{P} \in N \prec H(\kappa)$ con N numerable y $p \in \mathbb{P} \cap N$. Sea $\{D_n\}_{n \in \omega}$ una enumeración (tal vez con repeticiones) de los subconjuntos predensos de \mathbb{P} que están en N . Vamos a definir una sucesión decreciente de condiciones en $\mathbb{P} \cap N$. Tomamos $q_0 = p$ y, supuesto definido $q_n \in \mathbb{P} \cap N$, como D_n es predenso en \mathbb{P} , se cumple que $\bigvee r \in D_n \bigvee s \in \mathbb{P} (s \leq q_n \wedge s \leq r)$, pero esto mismo es cierto relativizado a $H(\kappa)$, luego también relativizado a N , luego existe $r \in D_n \cap N$ y existe un $q_{n+1} \in \mathbb{P} \cap N$ de modo que $q_{n+1} \leq q_n$ y $q_{n+1} \leq r$.

Como \mathbb{P} es \aleph_1 -cerrado, existe un $q \in \mathbb{P}$ que extiende a todos los q_n , luego en particular extiende a un elemento de cada $D_n \cap N$. Sucede entonces que $q \leq p$ es (N, \mathbb{P}) -genérico, pues $D_n \cap N$ es predenso bajo q , ya que existe $r \in D_n \cap N$ tal que $q \leq r$, luego toda extensión de q es compatible con un elemento de $D_n \cap N$. ■

Una propiedad común a los c.p.o.s con la c.c.n. y los \aleph_1 -cerrados es que conservan el cardinal \aleph_1 . Esto es válido en general para los c.p.o.s propios:

Teorema 10.11 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. propio M . Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces todo conjunto numerable de ordinales en $M[G]$ está contenido en un conjunto numerable de ordinales en M . En particular $\aleph_1^M = \aleph_1^{M[G]}$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $B = \sigma_G \in M[G]$ un conjunto numerable $^{M[G]}$ de ordinales. Sea $f : \omega \longrightarrow B$ suprayectiva tal que $f = \tau_G \in M[G]$. Consideremos un ordinal $\beta \in M$ tal que $B \subset \beta$. Si B no está contenido en ningún conjunto numerable M , entonces existe $p \in G$ tal que

$$p \Vdash \tau : \omega \longrightarrow \sigma \text{ suprayectiva } \wedge \sigma \subset \check{\beta} \wedge \bigwedge g \in \check{M} (g : \omega \longrightarrow \Omega \rightarrow \sigma \not\subset g[\omega]).$$

Para cada $n \in \omega$, sea $\tau_n = \{(\check{\alpha}, q) \in \beta \times \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge q \Vdash \check{\alpha} \in \tau(\check{n})\}$. Claramente $p \Vdash \tau_n = \tau(\check{n})$.

Fijamos $(\kappa > 2^{|\mathbb{P}|})^M$ tal que $\mathbb{P} \in H(\kappa)^M$ (luego también $\{\tau_n\}_{n \in \omega} \in H(\kappa)^M$) y sea $N \prec H(\kappa)^M$ numerable M que contenga a p y a $\{\tau_n\}_{n \in \omega}$, con lo que también contiene a cada τ_n . Sea $q \leq p$ una condición (N, \mathbb{P}) -genérica y pasemos a considerar un filtro genérico G tal que $q \in G$. Entonces cada $x \in \sigma_G$ es de la forma $\tau_G(n) = \tau_{nG} \in N[G] \cap \Omega = N \cap \Omega$, que es un conjunto de ordinales numerable M que contiene a σ_G , cuando p fuerza que no existe tal conjunto.

Esto implica que \mathbb{P} no colapsa a \aleph_1 , pues si \aleph_1^M fuera numerable $^{M[G]}$ debería estar contenido en un conjunto numerable M , lo cual es absurdo. ■

10.2 Preórdenes α -propios

La definición que hemos dado de c.p.o. propio no garantiza que si dos c.p.o.s son isomorfos, uno sea propio si y sólo si lo es el otro, porque depende de las propiedades de modelos que contengan a \mathbb{P} (de hecho a $(\mathbb{P}, \leq, \mathbb{1})$) y eso a su vez depende en principio de la naturaleza conjuntista de \mathbb{P} , y no sólo de su estructura de orden. En esta sección presentamos algunas caracterizaciones que no involucran modelos elementales, entre ellas una que es “intrínseca”, en el sentido de que sólo involucra al c.p.o. y a sus subconjuntos. En realidad conviene considerar una definición que incluye a la de c.p.o. propio como caso particular:

Definición 10.12 Sea $\alpha > 0$ un ordinal numerable y κ un cardinal no numerable. Una *torre* de longitud α en $H(\kappa)$ es una sucesión $N = \{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ de submodelos elementales numerables de $H(\kappa)$ tal que:

- a) Para todo ordinal límite $\lambda < \alpha$ se cumple $N_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} N_\delta$.
- b) Para todo $\beta < \beta + 1 < \alpha$ se cumple que $N_\beta \subset N_{\beta+1}$ y $\{N_\delta\}_{\delta \leq \beta} \in N_{\beta+1}$.

Un c.p.o. \mathbb{P} es α -*propio* si para todo cardinal regular κ suficientemente grande y toda torre $N = \{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ en $H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P} \in N_0$ y toda condición $p \in \mathbb{P} \cap N_0$, existe una condición $q \leq p$ que es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\delta < \alpha$ (y diremos entonces que q es (N, \mathbb{P}) -genérica).

Es claro que los c.p.o.s propios son los 1-propios en este sentido. Más aún, si $\beta < \alpha$, toda torre de longitud β puede extenderse a otra de longitud α , de donde se sigue que todo c.p.o. α -propio es β -propio.

Ejercicio: Todo c.p.o. α -propio es $\alpha + 1$ -propio.

De la prueba de 10.10 se sigue trivialmente que todo c.p.o. con la c.c.n. es α -propio para todo $\alpha < \omega_1$, pues allí se ve que toda condición es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica. También es fácil probar que todo c.p.o. \aleph_1 -cerrado es α -propio, usando dicho teorema para construir una sucesión decreciente $\{p_\delta\}_{\delta < \alpha}$ de condiciones tales que p_δ es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica.

Para caracterizar intrínsecamente los c.p.o.s α -proprios necesitamos la generalización de los conceptos de conjunto cerrado no acotado y estacionario que presentamos en el apéndice B. El teorema siguiente los relaciona con la definición de c.p.o. α -propio:

Teorema 10.13 Si κ es un cardinal regular no numerable, $X \subset H(\kappa)$ es numerable y $\alpha > 0$ es un ordinal numerable, el conjunto de las torres $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ de longitud α en $H(\kappa)$ está en $\mathcal{D}^\alpha H(\kappa)$.

DEMOSTRACIÓN: Fijemos una familia (numerable) de funciones de Skolem para el modelo $H(\kappa)$ y sea $S : \mathcal{P}^f H(\kappa) \longrightarrow \mathcal{P}^1 H(\kappa)$ la función que a cada x le asigna las imágenes por todas las funciones de Skolem de todas las combinaciones

posibles de argumentos en x . De este modo, todo $N \subset H(\kappa)$ cerrado para S cumple $N \prec H(\kappa)$. Definimos $F \in \mathcal{F}^\alpha(H(\kappa))$ mediante

$$F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) = S(x) \cup \{\{a_\delta\}_{\delta < \beta}\}.$$

De este modo, si $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha} \in G(F)$, se cumple que cada $N_\delta \prec H(\kappa)$ y

$$\{N_\delta\}_{\delta \leq \beta} \in F(\{N_\delta\}_{\delta < \beta+1}, \emptyset) \subset N_{\beta+1},$$

lo cual, junto con la propia definición de $\mathcal{P}^\alpha H(\kappa)$, prueba que $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ es una torre en $H(\kappa)$. Así pues, el conjunto de todas las torres contiene a $G(F)$ y, por consiguiente, está en $\mathcal{D}^\alpha H(\kappa)$. ■

Dado un c.p.o. \mathbb{P} , definimos $A = \mathbb{P} \cup \mathcal{P}\mathbb{P}$, que es un conjunto no numerable. Definimos $T^\alpha(\mathbb{P})$ como el conjunto de las sucesiones $a \in \mathcal{P}^\alpha A$ tales que para todo $p_0 \in a_0 \cap \mathbb{P}$ existe $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \leq p_0$ y para todo $\beta < \alpha$ y todo $D \in a_\beta \cap \mathcal{P}\mathbb{P}$ denso en \mathbb{P} se cumple que $D \cap a_\beta$ es predenso bajo p .

Teorema 10.14 *Para todo c.p.o. \mathbb{P} y todo ordinal numerable $\alpha > 0$, las afirmaciones siguientes son equivalentes:*

- a) \mathbb{P} es α -propio.
- b) Para todo cardinal regular κ suficientemente grande, el conjunto de las torres $N = \{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ en $H(\kappa)$ tales que $\mathbb{P} \in N_0$ y para toda $p \in \mathbb{P} \cap N_0$, existe una condición (N, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p$ está en $\mathcal{D}^\alpha H(\kappa)$.
- c) Existe un cardinal regular $\kappa > 2^{|\mathbb{P}|}$ tal que $\mathbb{P} \in H(\kappa)$ y el conjunto de las torres $N = \{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ en $H(\kappa)$ tales que $\mathbb{P} \in N_0$ y para toda $p \in \mathbb{P} \cap N_0$, existe una condición (N, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p$ está en $\mathcal{D}^\alpha H(\kappa)$.
- d) Para todo cardinal μ no numerable y todo E estacionario en $\mathcal{P}^\alpha \mu$, se cumple que $\mathbb{1} \Vdash \check{\mu}$ es no numerable y \dot{E} es estacionario en $\mathcal{P}^\alpha \check{\mu}$.
- e) Lo mismo que d), pero para $\mu = 2^{|\mathbb{P}|}$.
- f) $T^\alpha(\mathbb{P}) \in \mathcal{D}^\alpha A$, donde $A = \mathbb{P} \cup \mathcal{P}\mathbb{P}$.

DEMOSTRACIÓN: Claramente a) \Rightarrow b) \Rightarrow c). Veamos simultáneamente que b) \Rightarrow d) y que c) \Rightarrow e). Basta probar ambas implicaciones relativizadas a un modelo transitivo numerable M arbitrario de ZFC. Fijamos, pues, en M un cardinal μ no numerable que puede ser arbitrario o concretamente $\mu = 2^{|\mathbb{P}|}$, y tomamos E estacionario en $\mathcal{P}^\alpha \mu$.

Observamos ahora que la conclusión del teorema 10.11 es válida tanto bajo la hipótesis de b) como la de c). En efecto, en la prueba de 10.11 elegimos arbitrariamente un cardinal $\kappa > 2^{|\mathbb{P}|}$ tal que $\mathbb{P} \in H(\kappa)$, luego bajo la hipótesis c) podemos tomar el dado por dicha hipótesis.

Por el teorema anterior (manteniendo la notación de la prueba de 10.11), el conjunto de las α -torres tales que cumplen $p, \{\tau_n\}_{n \in \omega} \in N_0$ está en $\mathcal{D}^\alpha H(\kappa)$, porque es la intersección del conjunto de todas las α -torres con el conjunto

$\{a \in \mathcal{P}^\alpha H(\kappa) \mid \{p, \{\tau_n\}_{n \in \omega}\} \subset a_0\} \in \mathcal{D}^\alpha H(\kappa)$, luego podemos tomar una que además cumpla lo indicado en b) o c). Esto nos permite tomar una condición $q \leq p$ que sea, en particular, (N_0, \mathbb{P}) -genérica, y a partir de ahí la prueba de 10.11 continúa sin cambio alguno, considerando N_0 en el papel de N .

Por lo tanto, \mathbb{P} no colapsa a \aleph_1 y concluimos que $\mathbb{1} \Vdash \check{\mu}$ es no numerable. Supongamos, por reducción al absurdo, que existe un filtro genérico G tal que E no es estacionario en $(\mathcal{P}^\alpha \mu)^{M[G]}$. Eso significa que existe $F \in \mathcal{F}^\alpha(\mu)^{M[G]}$ tal que $G(F)^{M[G]} \cap E = \emptyset$. Pongamos que $F = \tau_G$ y sea $p \in \mathbb{P}$ tal que

$$p \Vdash \tau \in \mathcal{F}^\alpha(\check{\mu}) \wedge G(\tau) \cap \check{E} = \emptyset.$$

Bajo la hipótesis b) tomamos un cardinal regular κ suficientemente grande como para que $\mathbb{P}, p, \tau, \mu \in H(\kappa)^M$. Bajo la hipótesis c) el cardinal κ está fijado y cumple claramente que $\mathbb{P}, p, \mu \in H(\kappa)^M$, y como, por el teorema 10.1, se cumple que $F \in H(\kappa)^{M[G]} = H(\kappa)^M[G]$, también podemos suponer que $\tau \in H(\kappa)^M$.

Por los teoremas 10.13 y B.15 (relativizados a M) el conjunto de las sucesiones de la forma $\{\mu \cap N_\delta\}_{\delta < \alpha}$, donde $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ es una torre en $H(\kappa)$ con $\mathbb{P}, p, \tau, \mu \in N_0$, está en $\mathcal{D}^\alpha \mu$, y también lo está la intersección de este conjunto con el indicado en la hipótesis b) o c), luego existe una torre N que cumple la hipótesis de genericidad y además $a = \{\mu \cap N_\delta\}_{\delta < \alpha} \in E$.

Por consiguiente, existe una condición (N, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$. Entonces $F = \tau_G \in \mathcal{F}^\alpha(\mu)^{M[G]}$, pero $G(F)^{M[G]} \cap E = \emptyset$. Vamos a probar que $a \in G(F)^{M[G]}$ y tendremos una contradicción.

Fijamos $\beta < \alpha$ que no sea un límite. Pongamos que $\beta = \gamma + 1$ (el caso $\beta = 0$ es más fácil). Sabemos que $\mu, \{N_\delta\}_{\delta \leq \gamma} \in N_\beta$, luego $\{\mu \cap N_\delta\}_{\delta < \beta} \in N_\beta$, y si $x \subset \mu \cap N_\beta$ es finito, entonces $x \in N_\beta$. Como $F \in N_\beta[G]$, se cumple que $F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) \in N_\beta[G]$. También sabemos que $F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) \subset \mu$ es numerable $^{M[G]}$, luego $N_\beta[G] \prec H(\kappa)^{M[G]}$ implica que $F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) \subset N_\beta[G]$, luego en total

$$F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) \subset N_\beta[G] \cap \mu \subset N_\beta[G] \cap M \cap \mu = N_\beta \cap \mu = a_\beta.$$

Esto prueba que $a \in G(F) \cap E$.

Obviamente d) \Rightarrow e). Veamos que e) \Rightarrow f). Demostraremos la relativización de la implicación a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Observemos que $|A|^M = \mu$. Supongamos que en M se cumple que $T^\alpha(\mathbb{P}) \notin \mathcal{D}^\alpha A$, con lo que $E = \mathcal{P}^\alpha A \setminus T^\alpha(\mathbb{P})$ es estacionario.

Si $a \in E$, existe $p_0 \in a_0 \cap \mathbb{P}$ tal que para todo $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \leq p_0$ existe un $\beta < \alpha$ y un $D \in a_\beta \cap \mathbb{P}$ denso en \mathbb{P} tal que $a_\beta \cap D$ no es predenso bajo p . Tenemos, pues una función $g : E \rightarrow A$ dada por $g(a) = p_0 \in a_0$. Por el teorema B.14 existe $E_0 \subset E$ estacionario tal que todo $a \in E$ incumple su pertenencia a $T^\alpha(\mathbb{P})$ con la misma condición p_0 , es decir, para todo $a \in E$:

$$\bigwedge p \leq p_0 \bigvee \beta < \alpha \bigvee D \in a_\beta (D \text{ es denso en } \mathbb{P} \wedge a_\beta \cap D \text{ no es predenso bajo } p).$$

Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p_0 \in \mathbb{P}$. Es fácil ver que la hipótesis de que \mathbb{P} conserva los subconjuntos estacionarios de $\mathcal{P}^\alpha\mu$ y el hecho de que $|A| = \mu$ se traduce en que también conserva los subconjuntos estacionarios de $\mathcal{P}^\alpha A$, de modo que E es estacionario $^{M[G]}$.

Ahora razonamos en $M[G]$ y fijamos una función $F \in \mathcal{F}^\alpha(A)^{M[G]}$ tal que si D es denso en \mathbb{P}

$$F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, \{D\}) = \{q\} \quad \text{con } q \in D \cap G.$$

Podemos tomar $a \in E \cap G(F)$. Esto significa que si $D \in a_\beta$ es denso en \mathbb{P} , entonces $F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, \{D\}) \subset a_\beta$, luego $a_\beta \cap D \cap G \neq \emptyset$. Sea $p \leq p_0$ una condición que fuerce esto, es decir, tal que

$$p \Vdash \bigwedge \beta < \alpha \bigwedge D \in a_\beta (D \text{ es denso en } \check{\mathbb{P}} \rightarrow a_\beta \cap D \cap \Gamma \neq \emptyset).$$

Por la elección de E (razonando en M) tenemos que existen $\beta < \alpha$ y $D \in a_\beta$ de modo que D es denso en \mathbb{P} y $a_\beta \cap D$ no es predenso bajo p , luego existe una condición $q \leq p$ tal que $q \perp (a_\beta \cap D)$. Tomamos entonces un filtro genérico G tal que $q \in G$. Por la elección de p sucede que existe $r \in a_\beta \cap D \cap G$, pero entonces q es compatible con r y tenemos una contradicción.

Veamos finalmente que f) \Rightarrow a). Por reducción al absurdo, supongamos que existe un $\alpha > 0$ numerable tal que $T^\alpha(\mathbb{P}) \in \mathcal{D}^\alpha A$ pero \mathbb{P} no es α -propio. Llamamos α al menor ordinal que cumple esto. Entonces existe un cardinal regular $\kappa > 2^{|\mathbb{P}|}$ y una torre $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ en $H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P} \in N_0$ que no cumplen la definición de c.p.o. α -propio.

Como $\mathbb{P} \in N_0$ y $A = \mathbb{P} \cup \mathcal{P}\mathbb{P} \in H(\kappa)$, también $A \in N_0$, y como α se define a partir de \mathbb{P} , resulta que $\alpha \in N_0$, luego a su vez $\mathcal{P}^\alpha A, T_\alpha(\mathbb{P}) \in N_0$. Como $\{N_\delta\}_{\delta < \beta+1} \in N_{\beta+1}$, también $\{N_\delta \cap A\}_{\delta < \beta+1} \in N_{\beta+1}$.

Por hipótesis existe $F \in \mathcal{F}^\alpha A$ tal que $G(F) \subset T^\alpha(\mathbb{P})$, y podemos tomar $F \in N_0$. Entonces, si $x \in \mathcal{P}^f(N_{\beta+1})$, tenemos que $F(\{N_\delta \cap A\}_{\delta < \beta+1}, x) \in N_{\beta+1}$ y, al ser numerable, $F(\{N_\delta \cap A\}_{\delta < \beta+1}, x) \subset N_{\beta+1}$. Lo mismo vale claramente para 0 en lugar de $\beta + 1$, luego $\{N_\delta \cap A\}_{\delta < \alpha} \in G(F) \subset T^\alpha(\mathbb{P})$.

De este modo, por definición de $T^\alpha(\mathbb{P})$, si $p_0 \in N_0 \cap \mathbb{P} \subset (N_0 \cap A) \cap \mathbb{P}$, existe $p \in \mathbb{P}$ tal que $p \leq p_0$ y para todo $\beta < \alpha$ y todo $D \in (N_\beta \cap A) \cap \mathcal{P}\mathbb{P}$ denso en \mathbb{P} se cumple que $D \cap A \cap N_\beta$ es predenso bajo p . Observamos que la propiedad de p equivale a que si $D \in N_\beta$ es denso en \mathbb{P} entonces $D \cap N_\beta$ es predenso bajo p , lo cual equivale a decir que p es (N_β, \mathbb{P}) -genérico (véase la nota posterior a 10.7). Por lo tanto, la torre $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ sí que cumple la definición de c.p.o. α -propio, en contra de lo supuesto. ■

Observaciones

- a) La propiedad f) del teorema anterior depende únicamente de la estructura de orden de \mathbb{P} , luego ahora podemos afirmar que si dos c.p.o.s son semejantes y uno de ellos es α -propio el otro también lo es.

- b) En particular tenemos que un c.p.o. es propio si y sólo si conserva los subconjuntos estacionarios de $\mathcal{P}_{\aleph_1}\mu$, para todo cardinal no numerable μ o, equivalentemente, para $\mu = 2^{|\mathbb{P}|}$ (y en particular conserva la no numerabilidad de μ).
- c) Similarmente, para que un c.p.o. sea propio basta con que cumpla la definición 10.9 para un conjunto c.n.a. en $\mathcal{P}_{\aleph_1}H(\kappa)$ de submodelos elementales $N \prec H(\kappa)$.
- d) Si, dado un cardinal regular no numerable κ fijamos un buen orden \trianglelefteq en $H(\kappa)$, podemos considerar a $H(\kappa)$ como modelo del lenguaje formal que resulta de añadir al lenguaje de la teoría de conjuntos un relator binario que se interpreta como \trianglelefteq , y es claro que el teorema 10.13 vale con la misma prueba si consideramos torres de submodelos elementales de $(H(\kappa), \in, \trianglelefteq)$. Combinando esto con el teorema anterior, es inmediato que la definición de c.p.o. α -propio es equivalente a la que resulta de restringir las torres a torres de submodelos elementales de $(H(\kappa), \in, \trianglelefteq)$, para un buen orden \trianglelefteq prefijado arbitrariamente. De hecho, el mismo argumento nos permite incorporar cualquier otra relación, función o constante a $H(\kappa)$.
- e) En particular, la definición de c.p.o. propio puede restringirse sin pérdida de generalidad a submodelos elementales de $(H(\kappa), \in, \trianglelefteq)$. El interés de este hecho (y del caso general de la observación precedente) es que así podemos garantizar que objetos definidos en $H(\kappa)$ en términos del buen orden \trianglelefteq están realmente en los submodelos elementales considerados (si todos los parámetros de la definición están en ellos). ■

10.3 Iteración de extensiones propias

Como hemos explicado al principio del capítulo, la característica común a todas las propiedades que estudiamos aquí es que se conservan por iteraciones con soportes numerables. Dedicamos esta sección a probar que esto es válido para la propiedad de ser α -propio.

Observemos que si M es un modelo transitivo numerable de ZFC, $\mathbb{P} \in M$ es un c.p.o. y $\pi \in M$ es un nombre para un c.p.o. M , entonces podemos definir nombres canónicos

$$\Gamma_1 = \{(p, (p, \sigma)) \mid (p, \sigma) \in \mathbb{P} * \pi\}, \quad \Gamma_2 = \{(\sigma, (p, \sigma)) \mid (p, \sigma) \in \mathbb{P} * \pi\}$$

de modo que si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y H es un filtro π_G -genérico sobre $M[G]$ entonces $(\Gamma_1)_{G*H} = G$ y $(\Gamma_2)_{G*H} = H$.

Observemos ahora que las extensiones que estamos considerando de submodelos elementales no necesariamente transitivos se comportan bien respecto de productos generalizados de c.p.o.s:

Teorema 10.15 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea κ un cardinal regular no numerable M , sea $N \prec H(\kappa)^M$, sea $\mathbb{P} \in N$ un c.p.o. y sea $\pi \in N$ un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. M . Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sea H un filtro π_G -genérico sobre $M[G]$. Entonces $N[G * H] = N[G][H]$.*

DEMOSTRACIÓN: Si $u \in N[G][H]$, entonces $u = (\sigma_G)_H$, con $\sigma \in N$. Como $M[G][H] = M[G * H]$, es obvio que $\mathbf{1} \Vdash \forall x x = (\check{\sigma}_{\Gamma_1})_{\Gamma_2}$ (aquí hay que entender que τ_H se define trivialmente cuando τ no es un π_G -nombre). Más aún, como $\sigma \in H(\kappa)^M$, de hecho $\mathbf{1} \Vdash \forall x \in H(\kappa) x = (\check{\sigma}_{\Gamma_1})_{\Gamma_2}$, luego por 10.2 existe $\tau \in H(\kappa)^M$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \tau = (\check{\sigma}_{\Gamma_1})_{\Gamma_2}$. Como $\check{\sigma}, \Gamma_1, \Gamma_2 \in N$, podemos tomar $\tau \in N$, y entonces $u = (\sigma_G)_H = \tau_{G * H} \in N[G * H]$.

Para probar la inclusión opuesta observamos que para todo $\sigma \in M^{\mathbb{P} * \pi}$ existe $\bar{\sigma} \in M^\mathbb{P}$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \sigma = (\bar{\sigma}_{\Gamma_1})_{\Gamma_2}$. Definimos $\bar{\sigma}$ por recursión sobre el rango:

$$\bar{\sigma} = \{(\text{p.o.}(\bar{\tau}, \rho), p) \mid (\tau, (p, \rho)) \in \sigma\},$$

y claramente cumple lo pedido.

Por lo tanto, si $u \in N[G * H]$, tenemos que $u = \sigma_{G * H}$, con $\sigma \in N$, pero entonces $\bar{\sigma} \in N$, y $u = (\bar{\sigma}_G)_H \in N[G][H]$. ■

Las condiciones genéricas respecto de un producto generalizado tienen una caracterización natural:

Teorema 10.16 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y π un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. M . Sea κ un cardinal regular M suficientemente grande y $N \prec H(\kappa)^M$ numerable M tal que $\mathbb{P}, \pi \in N$. Entonces $(p, \sigma) \in \mathbb{P} * \pi$ es $(N, \mathbb{P} * \pi)$ -genérica si y sólo si p es (N, \mathbb{P}) -genérica y*

$$p \Vdash \check{\sigma} \text{ es } (\check{N}[\Gamma], \pi)\text{-genérica.}$$

DEMOSTRACIÓN: Usamos la caracterización 10.8 d). Si p es (N, \mathbb{P}) -genérica y $p \Vdash \check{\sigma}$ es $(\check{N}[\Gamma], \pi)$ -genérica y $G * H$ es un filtro genérico tal que $(p, \sigma) \in G * H$, entonces $p \in G$, luego $N[G] \cap \Omega = N \cap \Omega$, y por otra parte $\sigma_G \in H$, luego $N[G][H] \cap \Omega = N[G] \cap \Omega$. Por el teorema anterior

$$N[G * H] \cap \Omega = N[G][H] \cap \Omega = N[G] \cap \Omega = N \cap \Omega,$$

luego $(p, \sigma) \Vdash \check{N}[\Gamma] \cap \Omega = \check{N} \cap \Omega$, y esto implica que la condición (p, σ) es $(N, \mathbb{P} * \pi)$ -genérica.

Recíprocamente, si (p, σ) es $(N, \mathbb{P} * \pi)$ -genérica y G es un filtro genérico tal que $p \in G$, tomamos cualquier filtro genérico H que contenga a σ_G y entonces

$$N \cap \Omega \subset N[G] \cap \Omega \subset N[G][H] \cap \Omega = N[G * H] \cap \Omega = N \cap \Omega,$$

luego $p \Vdash \check{N} \cap \Omega = \check{N}[\Gamma] \cap \Omega$, luego p es (N, \mathbb{P}) -genérica. Este mismo argumento prueba también que $p \Vdash \check{\sigma}$ es $(\check{N}[\Gamma], \pi)$ -genérica. ■

Veamos a continuación que si \mathbb{P} es propio y $\mathbf{1} \Vdash \pi$ es propio entonces el producto $\mathbb{P} * \pi$ es propio. Para extender el resultado a iteraciones de longitud arbitraria necesitamos probar algo más general:

Teorema 10.17 Sea \mathbb{P} un c.p.o. propio y π un nombre para un c.p.o. tal que $\mathbf{1} \Vdash \pi$ es propio. Sea $\mathbb{R} = \mathbb{P} * \pi$, sea $\phi : \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{P}$ la proyección dada por $\phi(p, \sigma) = p$ y sea $i : \mathbb{P} \longrightarrow \mathbb{R}$ la inmersión completa dada por $i(p) = (p, \mathbf{1})$. Sea κ un cardinal regular no numerable y $N \prec H(\kappa)$ numerable tal que $\mathbb{R} \in N$. Sea $p \in \mathbb{P}$ una condición (N, \mathbb{P}) -genérica y sea $\sigma \in V^{\mathbb{P}}$ tal que

$$p \Vdash \sigma \in \check{N} \cap \check{\mathbb{R}} \wedge \check{\phi}(\sigma) \in \Gamma.$$

Entonces existe $\tau \in \hat{\pi}$ tal que (p, τ) es (N, \mathbb{R}) -genérica y $(p, \tau) \Vdash i(\sigma) \in \Gamma$.

(Notemos que Γ representa primero al \mathbb{P} -nombre canónico del filtro genérico y luego a \mathbb{R} -nombre canónico del filtro genérico.)

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$. Entonces $\sigma_G \in N \cap \mathbb{R}$ es de la forma $\sigma_G = (q, \tau_0)$, con $q \in G$ y $\tau_0 \in \hat{\pi}$. A su vez $\tau_{0G} \in \pi_G$. Como π_G es propio, existe una condición $r \leq \tau_{0G}$ que es $(N[G], \pi_G)$ -genérica. Con esto hemos probado que

$$p \Vdash \bigvee r q \tau_0 (r \in \pi \wedge \sigma = (q, \tau_0) \wedge r \leq \tau_{0G} \wedge r \text{ es } (\check{N}[\Gamma], \pi)\text{-genérica}).$$

Por 4.61 existe $\tau \in \hat{\pi}$ tal que

$$p \Vdash \bigvee q \tau_0 (\tau \in \pi \wedge \sigma = (q, \tau_0) \wedge q \in \Gamma \wedge \tau \leq \tau_{0G} \wedge \tau \text{ es } (\check{N}[\Gamma], \pi)\text{-genérica}).$$

En particular (p, τ) es (N, \mathbb{R}) -genérica por el teorema anterior.

Falta probar que $(p, \tau) \Vdash i(\sigma) \in \Gamma$. En efecto, si $G * H$ es un filtro genérico tal que $(p, \tau) \in G * H$, entonces $p \in G$, luego $\sigma_G = (q, \tau_0)$ con $q \in G$, $\tau_G \leq \tau_{0G}$. Como $\tau_G \in H$, también $\tau_{0G} \in H$, luego $i(\sigma)_{G * H} = \sigma_G \in G * H$. ■

Para deducir aquí que los productos generalizados de c.p.o.s propios son propios conviene suponer que además son separativos (recordemos a este respecto el teorema 8.15). Esto no supone ninguna pérdida de generalidad, pues todo c.p.o. puede sumergirse densamente en un c.p.o. separativo (en un álgebra de Boole completa, por ejemplo).

Concretamente, la propiedad básica que nos va a interesar es que si \mathbb{P} es separativo y $p, q \in \mathbb{P}$ cumplen $p \Vdash \check{q} \in \Gamma$, entonces $p \leq q$.

En efecto, en caso contrario existe $p' \leq p$, $p' \perp q$, y si G es un filtro genérico tal que $p' \in G$, entonces también $q \in G$, contradicción.

Teniendo esto en cuenta ya es fácil probar:

Teorema 10.18 Sea \mathbb{P} un c.p.o. propio y separativo y sea π un nombre para un c.p.o. tal que $\mathbf{1} \Vdash \pi$ es propio y separativo. Entonces $\mathbb{P} * \pi$ es propio y separativo.

DEMOSTRACIÓN: Por 8.15 sabemos que $\mathbb{P} * \pi$ es separativo. Fijemos un cardinal κ suficientemente grande, y un submodelo elemental $N \prec H(\kappa)$ numerable tal que $\mathbb{R} = \mathbb{P} * \pi \in N$. Si $r = (p, \tau) \in \mathbb{R} \cap N$, como \mathbb{P} es propio existe una

condición $p' \leq p$ que es (N, \mathbb{P}) -genérica. Obviamente (manteniendo la notación del teorema anterior) tenemos que $p' \Vdash \check{r} \in \check{N} \cap \check{\mathbb{R}} \wedge \check{\phi}(\check{r}) \in \Gamma$, luego existe $\tau \in \hat{\pi}$ tal que la condición $(p', \tau) \in \mathbb{R}$ es (N, \mathbb{R}) -genérica y $(p', \tau) \Vdash \check{r} \in \Gamma$. Como \mathbb{R} es separativo, esto último implica que $(p', \tau) \leq r$. ■

Ahora vamos a generalizar este hecho a iteraciones de longitud arbitraria. Para ello necesitamos previamente un resultado sobre iteraciones de c.p.o.s separativos:

Teorema 10.19 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC–AP y en M sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta < \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes separativos. Sean $\delta < \epsilon \leq \gamma$, sea $D \in M$ un conjunto denso en \mathbb{P}_ϵ , sea G un filtro \mathbb{P}_δ -genérico sobre M y sea $q \in \mathbb{P}_\epsilon$ tal que $q|_\delta \in G$. Entonces existe $d \in D$, $d \leq q$ tal que $d|_\delta \in G$.*

DEMOSTRACIÓN: En caso contrario, en $M[G]$ se cumple que

$$\bigwedge d \in D (d \leq q \rightarrow d|_\delta \notin G),$$

luego podemos tomar $p \in \mathbb{P}_\delta$ tal que $p \Vdash \check{q}|_\delta \in \Gamma \wedge \bigwedge d \in \check{D} (d \leq \check{q} \rightarrow d|_\delta \notin \Gamma)$. Como $p \Vdash \check{q}|_\delta \in \Gamma$ y \mathbb{P}_δ es separativo, la observación previa al teorema implica que $p \leq q|_\delta$. Definimos $q' \in \mathbb{P}_\epsilon$ mediante

$$q'(\alpha) = \begin{cases} p(\alpha) & \text{si } \alpha < \delta, \\ q(\alpha) & \text{si } \delta \leq \alpha < \epsilon, \end{cases}$$

entonces ciertamente $q' \in \mathbb{P}_\epsilon$ (en los ordinales límite se cumple cualquiera de las restricciones posibles sobre el soporte que estamos considerando, que sea finito, numerable o arbitrario, dado que p y q las cumplen) y es fácil ver que $q' \leq q$, y claramente $q'|_\delta = p$.

Ahora usamos que D es denso para tomar $d \in D$ tal que $d \leq q'$. En particular $d \leq q$ y $d|_\delta \leq q'|_\delta = p$, luego si G es un filtro \mathbb{P}_δ -genérico sobre M tal que $d|_\delta \in G$, tenemos una contradicción, pues $p \in G$ y entonces debería ser $d|_\delta \notin G$. ■

El teorema principal es el siguiente:

Teorema 10.20 *Sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables tal que, para cada $\delta < \gamma$, \mathbb{P}_δ sea propio y separativo¹ y $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es propio y separativo, sea κ un cardinal suficientemente grande y $N \prec H(\kappa)$ numerable tal que $\gamma, \mathbb{P}_\gamma \in N$. Sea $\gamma_0 \in \gamma \cap N$ y $q_0 \in \mathbb{P}_{\gamma_0}$ una condición $(N, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica. Entonces, si $\sigma_0 \in V^{\mathbb{P}_{\gamma_0}}$ cumple que*

$$q_0 \Vdash \sigma_0 \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N} \wedge \sigma_0|_{\gamma_0} \in \Gamma,$$

existe una condición (N, \mathbb{P}_γ) -genérica q tal que $q|_{\gamma_0} = q_0$ y $q \Vdash i_{\gamma_0\gamma}(\sigma_0) \in \Gamma$.

¹Una vez probado el teorema 10.21 la hipótesis de que \mathbb{P}_δ sea propio y separativo puede eliminarse.

DEMOSTRACIÓN: Razonamos por inducción sobre γ . Si $\gamma = 0$ no hay nada que probar. Supongamos que $\gamma = \delta + 1$. Si $\gamma_0 < \delta$, tenemos que

$$q_0 \Vdash \sigma_0|_{\delta} \in \check{\mathbb{P}}_{\delta} \cap \check{N} \wedge \sigma_0|_{\delta}|_{\tilde{\gamma}_0} \in \Gamma,$$

luego por hipótesis de inducción existe una condición (N, \mathbb{P}_{δ}) -genérica q_1 de manera que $q_1|_{\gamma_0} = q_0$ y $q_1 \Vdash i_{\gamma_0 \delta}(\sigma_0)|_{\tilde{\delta}} \in \Gamma$.

Puesto que $q_1 \leq i_{\gamma_0 \delta}(q_0)$, se cumple que $q_1 \Vdash i_{\gamma_0 \delta}(\sigma_0) \in \check{\mathbb{P}}_{\gamma} \cap \check{N}$, luego podemos suponer sin pérdida de generalidad que $\delta = \gamma_0$. En tal caso, puesto que, $\mathbb{P}_{\gamma} \cong \mathbb{P}_{\gamma_0} * \pi_{\gamma_0}$, basta aplicar el teorema 10.17.

Supongamos ahora que γ es un ordinal límite, que puede ser no numerable, pero en cualquier caso $\gamma \cap N$ es un conjunto numerable de ordinales. Como γ es un ordinal límite^N, es claro que $\gamma \cap N$ no está acotado, luego podemos tomar una sucesión cofinal creciente $\{\gamma_n\}_{n \in \omega}$ tal que $\gamma_n \in \gamma \cap N$ y no acotada en $\gamma \cap N$. Además podemos suponer que γ_0 es el ordinal dado en el enunciado. Sea $\{D_n\}_{n \in \omega}$ una enumeración de los subconjuntos densos de \mathbb{P}_{γ} pertenecientes a N . Vamos a definir recurrentemente condiciones $q_n \in \mathbb{P}_{\gamma_n}$ y nombres $\sigma_n \in V^{\mathbb{P}_{\gamma_n}}$ tales que:

- a) $q_0 \in \mathbb{P}_{\gamma_0}$ es la condición dada en el enunciado, q_n es $(N, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica y $q_{n+1}|_{\gamma_n} = q_n$.
- b) σ_0 es el nombre dado en el enunciado y, para $n > 0$,

$$q_n \Vdash \sigma_n \in \check{N} \cap \check{D}_{n-1} \wedge \sigma_n|_{\tilde{\gamma}_n} \in \Gamma \wedge \sigma_n \leq i_{\gamma_{n-1} \gamma_n}(\sigma_{n-1}).$$

Admitamos que hemos construido estas sucesiones y sea $\bar{q} = \bigcup_{n < \omega} q_n \in \mathbb{P}_{\bar{\gamma}}$, donde $\bar{\gamma} = \bigcup_{n \in \omega} \gamma_n$ (y aquí usamos que $\mathbb{P}_{\bar{\gamma}}$ tiene soportes numerables) y sea $q = i_{\bar{\gamma}, \gamma}(\bar{q})$. Sea $\sigma'_n = i_{\gamma_n \gamma}(\sigma_n)$.

Podemos relativizar toda la demostración a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Veamos que si $m < n$ entonces

$$q \Vdash \sigma'_n \in \check{\mathbb{P}}_{\gamma} \cap \check{N} \cap \check{D}_{n-1} \wedge \sigma'_n \leq \sigma'_m.$$

Para ello tomamos un filtro genérico G tal que $q \in G$ y observamos que $q \leq i_{\gamma_n \gamma}(q_n)$, luego $q_n \in G_{\gamma_n}$, luego $\sigma'_{nG} = \sigma_{nG_{\gamma_n}} \in \mathbb{P}_{\gamma} \cap N \cap D_{n-1}$. Además

$$\sigma'_{nG} = (\sigma_n)_{G_{\gamma_n}} \leq i_{\gamma_{n-1} \gamma_n}(\sigma_{n-1})_{G_{\gamma_n}} = (\sigma_{n-1})_{G_{\gamma_{n-1}}} = \sigma'_{n-1G}.$$

De aquí se sigue obviamente que $\sigma'_n \leq \sigma'_m$.

Veamos ahora que $q \Vdash \sigma'_n \in \Gamma$. Sea $q' \leq q$ y tomemos un filtro G tal que $q' \in G$. Entonces $q \in G$ y como antes $q_n \in G_{\gamma_n}$, luego $p = \sigma'_{nG} \in \mathbb{P}_{\gamma} \cap N$ y tomamos una condición $q'' \in G$, $q'' \leq q'$, tal que $q'' \Vdash \sigma'_n = p$. Ahora pasamos a un filtro G tal que $q'' \in G$. Nuevamente $q_n \in G_{\gamma_m}$ para todo m , luego $\sigma'_{mG}|_{\gamma_m} = \sigma_{mG_{\gamma_m}} \in G_{\gamma_m}$. Así, si $m > n$, tenemos que $\sigma'_{mG} \leq \sigma'_{nG}$, luego

$\sigma'_{mG}|_{\gamma_m} \leq \sigma'_{nG}|_{\gamma_m}$, luego $\sigma'_{nG}|_{\gamma_m} \in G_{\gamma_m}$. Equivalentemente, $p|_{\gamma_m} \in G_{\gamma_m}$, para todo $m > n$.

Si llamamos $p'_m = i_{\gamma_m\gamma}(p|_{\gamma_m})$, tenemos que $p'_m \in G$, luego hemos probado que $q'' \Vdash \check{p}'_m \in \Gamma$, para todo m . Como \mathbb{P}_γ es separativo, $q'' \leq p'_m = i_{\gamma_m\gamma}(p|_{\gamma_m})$. A su vez, de aquí concluimos que $q'' \leq i_{\tilde{\gamma}\gamma}(p|_{\tilde{\gamma}}) = p$, puesto que, como $p \in N$, se cumple que $\text{sop } p \subset \gamma \cap N \subset \tilde{\gamma}$. Por lo tanto $p \in G$ y esto prueba que $q'' \Vdash \sigma'_n \in \Gamma$. Con esto tenemos que el conjunto de condiciones que fuerzan $\sigma'_n \in \Gamma$ es denso bajo q , luego $q \Vdash \sigma'_n \in \Gamma$. En definitiva,

$$q \Vdash \sigma'_n \in \check{N} \cap \check{D}_{n-1} \cap \Gamma,$$

y el teorema 10.8 implica que q es una condición (N, \mathbb{P}_γ) -genérica. Obviamente cumple $q|_{\gamma_0} = q_0$ y hemos visto que $q \Vdash \sigma'_0 \in \Gamma$, como requiere el enunciado.

Sólo falta construir las sucesiones $\{q_n\}_n$ y $\{\sigma_n\}_n$ en las condiciones indicadas.

Partimos de la condición q_0 y el nombre σ_0 dados en el enunciado, que claramente cumplen lo requerido. Supongamos definidos q_n y σ_n . Tomemos un filtro \mathbb{P}_{γ_n} -genérico G tal que $q_n \in G$. Entonces $p_n = \sigma_{nG} \in \mathbb{P}_\gamma \cap N$ cumple que $p_n|_{\gamma_n} \in G$. Se cumple entonces que existe una condición $p_{n+1} \in D_n \cap N$ tal que $p_{n+1} \leq p_n$ y $p_{n+1}|_{\gamma_n} \in G$. En efecto, basta aplicar el teorema 10.19 al colapso transitivo \check{N} y al filtro colapsado \check{G} , que \check{P} -genérico sobre \check{N} porque la condición $q_n \in G$ es $(N, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica. De este modo, hemos probado que

$$q_n \Vdash \forall p \in \check{D}_n \cap \check{N} (p \leq \sigma_n \wedge p|_{\gamma_n} \in \Gamma),$$

luego existe $\sigma_{n+1}^* \in M^{\mathbb{P}_{\gamma_n}}$ tal que

$$q_n \Vdash (\sigma_{n+1}^* \in \check{D}_n \cap \check{N} \wedge \sigma_{n+1}^* \leq \sigma_n \wedge \sigma_{n+1}^*|_{\gamma_n} \in \Gamma).$$

Ahora aplicamos la hipótesis de inducción tomando como γ_0 el ordinal γ_n y como γ el ordinal γ_{n+1} (que es menor que γ , luego podemos aplicarle ciertamente la hipótesis de inducción). Más concretamente, la “traducción” es:

$$\frac{\gamma_0 \quad \gamma \quad q_0 \quad \sigma_0}{\gamma_n \quad \gamma_{n+1} \quad q_n \quad \sigma_{n+1}^*|_{\gamma_n}}$$

y la conclusión es que existe $q_{n+1} \in \mathbb{P}_{\gamma_{n+1}}$ que es $(N, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica, $q_{n+1}|_{\gamma_n} = q_n$ y, llamando $\sigma_{n+1} = i_{\gamma_n\gamma_{n+1}}(\sigma_{n+1}^*)$, se cumple que

$$q_{n+1} \Vdash \sigma_{n+1} \in \Gamma.$$

De hecho entonces, como $q_{n+1} \leq i_{\gamma_n\gamma_{n+1}}(q_n)$, es claro que q_{n+1} y σ_{n+1} cumplen todo lo requerido. ■

Ahora ya podemos probar:

Teorema 10.21 *Sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables tal que, para cada $\delta < \gamma$, $1_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es propio y separativo. Entonces \mathbb{P}_δ es propio y separativo, para todo $\delta \leq \gamma$.*

DEMOSTRACIÓN: Veamos por inducción sobre δ que \mathbb{P}_δ es propio y separativo:

Como $\mathbb{P}_0 = \{\mathbb{1}\}$, el resultado es trivial en este caso. Si es válido para δ , el teorema 10.18 nos da el resultado para $\delta + 1$. Supongamos ahora que vale para todo $\delta < \lambda \leq \gamma$. Equivalentemente, podemos suponer que $\gamma = \lambda$, de modo que estamos en las condiciones del teorema anterior. Fijamos, como allí, un cardinal κ , un submodelo elemental $N \prec H(\kappa)$ tal que $\gamma, \mathbb{P}_\gamma \in N$ y una condición $p \in \mathbb{P}_\gamma \cap N$. Tomamos $\gamma_0 = 0$, de modo que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_0} \Vdash \check{p} \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N} \wedge \check{p}|_0 \in \Gamma.$$

Por el teorema anterior existe una condición (N, \mathbb{P}_γ) -genérica q tal que $q \Vdash \check{p} \in \Gamma$, que por la separatividad equivale a $q \leq p$. ■

Seguidamente generalizamos este resultado al caso de c.p.o.s α -propios. La prueba del teorema siguiente es una modificación trivial de la del teorema 10.17:

Teorema 10.22 *Sea $\alpha > 0$ un ordinal numerable, sea \mathbb{P} un c.p.o. α -propio y π un nombre para un c.p.o. tal que $\mathbb{1} \Vdash \pi$ es $\check{\alpha}$ -propio. Sea $\mathbb{R} = \mathbb{P} * \pi$, sea $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{P}$ la proyección dada por $\phi(p, \sigma) = p$ y sea $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{R}$ la inmersión completa dada por $i(p) = (p, \mathbb{1})$. Sea κ un cardinal regular no numerable y $N = \{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ una torre en $H(\kappa)$ tal que $\mathbb{R} \in N_0$. Sea $p \in \mathbb{P}$ una condición (N, \mathbb{P}) -genérica y sea $\sigma \in V^\mathbb{P}$ tal que*

$$p \Vdash \sigma \in \check{N}_0 \cap \check{\mathbb{R}} \wedge \check{\phi}(\sigma) \in \Gamma.$$

Entonces existe $\tau \in \hat{\pi}$ tal que (p, τ) es (N, \mathbb{R}) -genérica y $(p, \tau) \Vdash i(\sigma) \in \Gamma$.

A su vez, la prueba de 10.18 se adapta ahora trivialmente para obtener:

Teorema 10.23 *Sea $\alpha > 0$, sea P un c.p.o. α -propio y separativo y sea π un nombre para un c.p.o. tal que $\mathbb{1} \Vdash \pi$ es $\check{\alpha}$ -propio y separativo. Entonces $\mathbb{P} * \pi$ es α -propio y separativo.*

En cambio, la generalización de 10.20 no es inmediata:

Teorema 10.24 *Sea $\alpha > 0$ un ordinal numerable y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables tal que, para cada $\delta < \gamma$, \mathbb{P}_δ sea α -propio y separativo y $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es $\check{\alpha}$ -propio y separativo, sea κ un cardinal regular suficientemente grande y $N = \{N_\delta\}_{\delta \leq \alpha}$ una torre de longitud $\alpha + 1$ en $H(\kappa)$ tal que $\alpha, \gamma, \mathbb{P}_\gamma \in N_0$, sea $\gamma_0 \in \gamma \cap N_0$ y $q_0 \in \mathbb{P}_{\gamma_0}$ una condición $(N, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica. Entonces, si $\sigma_0 \in V^{\mathbb{P}_{\gamma_0}}$ cumple que*

$$q_0 \Vdash \sigma_0 \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N}_0 \wedge \sigma_0|_{\gamma_0} \in \Gamma,$$

existe una condición (N, \mathbb{P}_γ) -genérica q tal que $q|_{\gamma_0} = q_0$ y $q \Vdash i_{\gamma_0 \gamma}(\sigma_0) \in \Gamma$.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar el teorema relativizado a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Razonamos por inducción sobre α . Para $\alpha = 1$ ya lo tenemos probado.

Supongamos que $\alpha = \beta + 1$. Sea G un filtro \mathbb{P}_{γ_0} -genérico sobre M tal que $q_0 \in G$ y sea $p_0 = \sigma_{0G} \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_0$, que cumple $p_0|_{\gamma_0} \in G$. Por lo tanto, existe $q'_0 \in G$ tal que $q'_0 \leq q_0$ y $q'_0 \leq p_0|_{\gamma_0}$. Notemos que q'_0 también es $(N, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica.

Ahora aplicamos la hipótesis de inducción a β , con la torre $\{N_\delta\}_{\delta \leq \beta}$, la condición q'_0 y el nombre \check{p}_0 . Obtenemos así una condición $(N_\delta, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica para todo $\delta < \alpha$, tal que $q'|_{\gamma_0} = q'_0$ y $q' \Vdash \check{p}_0 \in \Gamma$, es decir, $q' \leq p_0$.

En particular tenemos que q' es $(N_\delta, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica para todo $\delta < \alpha$, $q'|_{\gamma_0} \in G$ y $q' \leq p_0$. Como $N_\alpha[G] \prec H(\kappa)[G]$ y todos los parámetros están en $N_\alpha[G]$, podemos tomar un $q' \in N_\alpha[G]$ que cumpla estos hechos. Más aún, entonces $q' \in M \cap N_\alpha[G] = N_\alpha$, ya que $q_0 \in G$ es $(N_\alpha, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica (teorema 10.8). Con esto hemos probado que

$$q_0 \Vdash \forall q'(q' \in \check{N}_\alpha \cap \check{\mathbb{P}}_\gamma \wedge q' \text{ es } (\check{N}', \check{\mathbb{P}}_\gamma)\text{-genérica} \wedge q'|_{\gamma_0} \in \Gamma \wedge q' \leq \sigma_0),$$

donde $N' = \{N_\delta\}_{\delta \leq \beta}$, luego por 4.61 existe $\sigma'_0 \in M^{\mathbb{P}_{\gamma_0}}$ tal que

$$q_0 \Vdash (\sigma'_0 \in \check{N}_\alpha \cap \check{\mathbb{P}}_\gamma \wedge \sigma'_0 \text{ es } (\check{N}', \check{\mathbb{P}}_\gamma)\text{-genérica} \wedge \sigma'_0|_{\gamma_0} \in \Gamma \wedge \sigma'_0 \leq \sigma_0).$$

A su vez ahora podemos aplicar el teorema 10.20, que nos da una condición $(N_\alpha, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica q tal que $q|_{\gamma_0} = q_0$ y $q \Vdash i_{\gamma_0\gamma}(\sigma'_0) \in \Gamma$, luego también se cumple que $q \Vdash i_{\gamma_0\gamma}(\sigma_0) \in \Gamma$ y de hecho q es (N, \mathbb{P}_γ) -genérica, pues si G es un filtro \mathbb{P}_γ -genérico tal que $q \in G$, entonces $\sigma_{0G_{\gamma_0}} \in G$ y es $(N_\delta, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica, para todo $\delta \leq \beta$, luego $N_\delta[G] \cap M = N_\delta$, por el teorema 10.8, y este mismo teorema implica entonces que q es $(N_\delta, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica. Como también es $(N_\alpha, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica, concluimos que es (N, \mathbb{P}_γ) -genérica.

Ahora suponemos que α es un ordinal límite, y podemos tomar una sucesión $\{\alpha_n\}_{n \in \omega} \in N_0$ cofinal creciente en α . A su vez razonamos por inducción sobre γ . Si $\gamma = 0$ no hay nada que probar. Supongamos que $\gamma = \delta + 1$. Entonces, si $\gamma_0 < \delta$, tenemos que

$$q_0 \Vdash \sigma_0|_{\delta} \in \check{\mathbb{P}}_\delta \cap \check{N}_0 \wedge \sigma_0|_{\delta}|_{\gamma_0} \in \Gamma,$$

luego por hipótesis de inducción existe una condición (N, \mathbb{P}_δ) -genérica q_1 tal que $q_1|_{\gamma_0} = q_0$ y $q_1 \Vdash i_{\gamma_0\gamma'}(\sigma_0)|_{\delta} \in \Gamma$.

Puesto que $q_1 \leq i_{\gamma_0\delta}(q_0)$, por otra parte $q_1 \Vdash i_{\gamma_0\delta}(\sigma_0) \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N}$, luego podemos suponer sin pérdida de generalidad que $\delta = \gamma_0$, y en tal caso basta aplicar el teorema anterior.

Supongamos por último que γ es un ordinal límite. Vamos a definir una sucesión $\{\gamma_n\}_{n < \omega}$ de ordinales menores que γ , para lo cual distinguimos dos casos: si $\text{cf } \gamma = \aleph_0$ entonces tomamos una sucesión cofinal creciente en γ tal que $\{\gamma_n\}_{n \in \omega} \in N_0$ y γ_0 sea el dado en el enunciado. Si $\text{cf } \gamma > \aleph_0$ entonces tomamos

$\gamma_n = \sup(\gamma \cap N_{\alpha_{n-1}}) < \gamma$. Notemos que en ambos casos $\gamma_n \in N_{\alpha_n}$ y la sucesión es estrictamente creciente.

Vamos a definir recurrentemente una sucesión de condiciones $\{q_n\}_{n \in \omega}$ tal que $q_n \in \mathbb{P}_{\gamma_n}$ y una sucesión $\{\sigma_n\}_{n \in \omega}$ tal que $\sigma_n \in M^{\mathbb{P}_{\gamma_n}}$ y de modo que:

- a) q_0 es la condición dada en el enunciado y si $n > 0$ la condición q_n es $(N^n, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica, donde $N^n = \{N_\delta\}_{\alpha_n < \delta \leq \alpha}$ y $q_{n+1}|_{\gamma_n} = q_n$.
- b) σ_0 es el nombre dado en el enunciado y si $n > 0$ entonces

$$q_n \Vdash \sigma_n \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N}_{\alpha_n+1} \wedge \sigma_n|_{\gamma_n} \in \Gamma \wedge \sigma_n \leq i_{\gamma_{n-1}\gamma_n}(\sigma_{n-1}) \wedge$$

$$\sigma_n \text{ es } (\check{N}^{*n}, \check{\mathbb{P}}_\gamma)\text{-genérica,}$$

$$\text{donde } N^{*n} = \{N_\delta\}_{\delta \leq \alpha_n}.$$

Supongamos que tenemos una sucesión en estas condiciones. Entonces podemos tomar $\bar{q} = \bigcup_{n \in \omega} q_n \in \mathbb{P}_{\bar{\gamma}}$, donde $\bar{\gamma} = \bigcup_{n \in \omega} \gamma_n$ (y aquí usamos que la iteración tiene soportes numerables), sea $q = i_{\bar{\gamma}, \gamma}(\bar{q}) \in \mathbb{P}_\gamma$ y sea $\sigma'_n = i_{\gamma_n \gamma}(\sigma_n)$. Entonces $q \Vdash \sigma'_n \in \Gamma$. En efecto:

Sea $q' \leq q$ y tomemos un filtro G tal que $q' \in G$. Entonces $q_n \in G_{\gamma_n}$, luego $p = \sigma'_{nG} \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_{\alpha_n+1}$. Tomamos una condición $q'' \in G$, $q'' \leq q'$, tal que $q'' \Vdash \sigma'_n = p$. Ahora pasamos a un filtro G tal que $q'' \in G$.

Entonces $q_n \in G_{\gamma_m}$ para todo m , luego $\sigma'_{mG}|_{\gamma_m} = \sigma_{mG, \gamma_m} \in G_{\gamma_m}$. Así, si $m > n$, tenemos que $\sigma'_{mG} \leq \sigma'_{nG}$, luego $\sigma'_{mG}|_{\gamma_m} \leq \sigma'_{nG}|_{\gamma_m}$, luego $\sigma'_{nG}|_{\gamma_m} \in G_{\gamma_m}$. Equivalentemente, $p|_{\gamma_m} \in G_{\gamma_m}$, para todo $m > n$.

Si llamamos $p'_m = i_{\gamma_m \gamma}(p|_{\gamma_m})$, tenemos que $p'_m \in G$, luego hemos probado que $q'' \Vdash p'_m \in \Gamma$, para todo m . Como \mathbb{P}_γ es separativo, $q'' \leq p'_m = i_{\gamma_m \gamma}(p|_{\gamma_m})$. A su vez, de aquí concluimos que $q'' \leq i_{\bar{\gamma} \gamma}(p|_{\bar{\gamma}}) = p$, ya que, como $p \in N_{\alpha_n+1}$, se cumple que $\text{sop } p \subset \gamma \cap N_{\alpha_n+1} \subset \gamma_{n+2} \subset \bar{\gamma}$. Por lo tanto $p \in G$ y esto prueba que $q'' \Vdash \sigma'_n \in \Gamma$. Con esto tenemos que el conjunto de condiciones que fuerzan $\sigma'_n \in \Gamma$ es denso bajo q , luego $q \Vdash \sigma'_n \in \Gamma$.

Como $q \Vdash \sigma'_n$ es $(\check{N}^{*n}, \check{\mathbb{P}}_\gamma)$ -genérica, de hecho q es $(N^{*n}, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica para todo n , pues, dada una condición $p \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_0$, podemos tomar un filtro genérico G tal que $p \in G$, y entonces $\sigma'_{nG} \in G$ es $(N^{*n}, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica, y existe una condición $p' \in G$ tal que $p' \leq p$ y $p' \leq \sigma'_{nG}$, y esto último implica que p' también es $(N^{*n}, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica.

Pero esto es tanto como decir que es \mathbb{P}_γ -genérica para la torre $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$, pero esto es lo mismo que ser (N, \mathbb{P}_γ) -genérica, porque α es un ordinal límite y todo $D \in N_\alpha$ predenso en \mathbb{P}_γ está de hecho en un N_δ , con $\delta < \alpha$, luego $D \cap N_\delta$ es predenso bajo q , luego $D \cap N_\alpha$ también.

Por lo tanto, la condición q cumple lo requerido, de modo que basta probar que existen las sucesiones indicadas.

Partimos de q_0 y σ_0 , que son los dados en el enunciado. Supongamos construidos q_n y σ_n de modo que cumplan las condiciones indicadas.

Fijemos un filtro \mathbb{P}_{γ_n} -genérico G tal que $q_n \in G$. Sea $p = \sigma_{nG} \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_{\alpha_{n+1}}$, de modo que $p|_{\gamma_n} \in G$. Podemos tomar una condición $q'_n \in G$ tal que $q'_n \leq q_n$ y $q'_n \Vdash \sigma_n = \check{p}$. Ahora podemos aplicar la hipótesis de inducción a α_{n+1} . Concretamente, aplicamos el enunciado a:

$$\frac{\alpha \quad \gamma_0 \quad \gamma \quad q_0 \quad \sigma_0 \quad N}{\alpha_{n+1} \quad \gamma_n \quad \gamma \quad q'_n \quad \sigma_n \quad \{N_\delta\}_{\alpha_n < \delta \leq \alpha_{n+1}}}$$

De este modo obtenemos una condición $(\{N_\delta\}_{\alpha_n < \delta \leq \alpha_{n+1}}, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica q^*_n tal que $q^*_n|_{\gamma_n} = q'_n$ y $q^*_n \Vdash i_{\gamma_n \gamma}(\sigma_n) \in \Gamma$. Esto último equivale a que $q^*_n \leq p$.

Ahora usamos que $N_{\alpha_{n+1}+1}[G] \prec H(\kappa)^M[G]$ para tomar $q^* \in N_{\alpha_{n+1}+1}$ tal que q^* es $(\{N_\delta\}_{\alpha_n < \delta \leq \alpha_{n+1}}, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica, $q^*|_{\gamma_n} \in G$, $q^* \leq p$. En principio la tomamos en $N_{\alpha_{n+1}+1}[G]$, pero entonces $q^* \in N_{\alpha_{n+1}+1}[G] \cap M = N_{\alpha_{n+1}+1}$, porque $q_n \in G$ es $(N_{\alpha_{n+1}+1}, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica.

Con esto hemos probado que

$$\begin{aligned} q_n \Vdash \forall q^* \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N}_{\alpha_{n+1}+1} (q^* \text{ es } (\{\check{N}_\delta\}_{\check{\alpha}_n < \delta \leq \check{\alpha}_{n+1}}, \check{\mathbb{P}}_\gamma) \text{-genérica} \\ \wedge q^*|_{\check{\gamma}_n} \in \Gamma \wedge q^* \leq \sigma_n). \end{aligned}$$

Por lo tanto podemos tomar un $\sigma_{n+1}^* \in M^{\mathbb{P}_{\gamma_n}}$ tal que

$$\begin{aligned} q_n \Vdash (\sigma_{n+1}^* \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N}_{\alpha_{n+1}+1} \wedge \sigma_{n+1}^* \text{ es } (\{\check{N}_\delta\}_{\check{\alpha}_n < \delta \leq \check{\alpha}_{n+1}}, \check{\mathbb{P}}_\gamma) \text{-genérica} \\ \wedge \sigma_{n+1}^*|_{\check{\gamma}_n} \in \Gamma \wedge \sigma_{n+1}^* \leq \sigma_n). \end{aligned}$$

Notemos que como $q_n \Vdash \sigma_n$ es $(\check{N}^{*n}, \check{\mathbb{P}}_\gamma)$ -genérica, lo mismo vale para σ_{n+1}^* , luego de hecho $q_n \Vdash \sigma_{n+1}^*$ es $(\check{N}^{*n+1}, \check{\mathbb{P}}_\gamma)$ -genérica.

Ahora aplicamos la hipótesis de inducción para α y γ_{n+1} . Concretamente, aplicamos el enunciado a:

$$\frac{\alpha \quad \gamma_0 \quad \gamma \quad q_0 \quad \sigma_0 \quad N}{\alpha \quad \gamma_n \quad \gamma_{n+1} \quad q_n \quad \sigma_{n+1}^*|_{\check{\gamma}_{n+1}} \quad N^{n+1}}$$

Concluimos que existe una condición $(N^{n+1}, \mathbb{P}_{\gamma_{n+1}})$ -genérica q_{n+1} de manera que $q|_{\gamma_n} = q_n$ y $q_{n+1} \Vdash i_{\gamma_n \gamma_{n+1}}(\sigma_{n+1}^*|_{\gamma_{n+1}}) \in \Gamma$. Finalmente basta llamar $\sigma_{n+1} = i_{\gamma_n \gamma_{n+1}}(\sigma_{n+1}^*)$, y así, como $q_{n+1} \leq i_{\gamma_n \gamma_{n+1}}(q_n)$, es claro que cumple todo lo requerido. ■

Ahora la prueba de 10.21 se adapta trivialmente para concluir:

Teorema 10.25 *Sea $\alpha > 0$ un ordinal numerable y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta < \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables tal que, para cada $\delta < \gamma$, $\mathbb{P}_\delta \Vdash \pi_\delta$ es $\check{\alpha}$ -propio y separativo. Entonces \mathbb{P}_δ es α -propio y separativo, para todo $\delta \leq \gamma$.*

Veamos ahora que el teorema 8.31 vale también para iteraciones con soportes numerables si suponemos que los c.p.o.s de la iteración son propios:

Teorema 10.26 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y, en M , sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de longitud $\gamma = \alpha + \beta$ con soportes numerables tal que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es propio y separativo, y sea G_α un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M . Entonces en $M[G_\alpha]$ existe una iteración de c.p.o.s $(\{\mathbb{P}'_\delta\}_{\delta \leq \beta}, \{\pi'_\delta\}_{\delta < \beta})$ con soportes numerables y una familia de inmersiones densas $j_{\alpha\delta} : \mathbb{P}_{\alpha+\delta}/G_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}'_\delta$ tales que si G'_δ es un filtro \mathbb{P}'_δ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ y $G_{\alpha+\delta} = j_{\alpha\delta}^{-1}[G'_\delta]$, entonces $(\pi'_\delta)_{G'_\delta} = (\pi_{\alpha+\delta})_{G_{\alpha+\delta}}$.*

DEMOSTRACIÓN: Toda la prueba de 8.31 vale literalmente en este contexto salvo el caso límite de la construcción recurrente, que es el único punto en el que se usa que la iteración tiene soportes finitos. Así pues, suponemos que tenemos la iteración $(\{\mathbb{P}'_\delta\}_{\delta \leq \lambda}, \{\pi'_\delta\}_{\delta < \lambda})$ y definimos $j_{\alpha\lambda} : \mathbb{P}_{\alpha+\lambda}/G_\alpha \longrightarrow \mathbb{P}'_\lambda$ mediante $j_{\alpha\lambda}(p)(\delta) = j_{\alpha,\delta+1}(p|_{\delta+1})(\delta)$. El problema es demostrar que $j_{\alpha\lambda}$ así definida es también una inmersión densa, sabiendo que lo son las $j_{\alpha\delta}$, para $\delta < \lambda$.

Por 10.21 sabemos también que \mathbb{P}_α es propio. Si $\text{cf } \lambda > \aleph_0$ la demostración para el caso de soportes finitos de adapta trivialmente, pero ahora daremos un argumento válido para todo λ . En primer lugar demostraremos que la imagen de $j_{\alpha\lambda}$ es densa en \mathbb{P}'_λ .

En $M[G_\alpha]$ tenemos las inmersiones densas $j_{\alpha\delta}$ que a cada \mathbb{P}'_δ -nombre le asignan un $\mathbb{P}_{\alpha+\delta}/G_\alpha$ -nombre (que en particular es un $\mathbb{P}_{\alpha+\delta}$ -nombre) según el teorema 4.42. A partir de ella podemos construir una aplicación $F_\delta : \hat{\pi}'_\delta \longrightarrow \hat{\pi}_{\alpha+\delta}$ con la propiedad de que si G'_δ es un filtro \mathbb{P}'_δ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ y $G_{\alpha+\delta} = j_{\alpha\delta}^{-1}[G'_\delta]$, entonces $F_\delta(\sigma)_{G_{\alpha+\delta}} = \sigma_{G'_\delta}$.

Más aún, todos los objetos que hemos construido en $M[G_\alpha]$ (la iteración, las inmersiones, la sucesión de aplicaciones “traductoras” $\{F_\delta\}_{\delta < \lambda}$) han sido definidos a partir exclusivamente de la iteración en M y del filtro genérico G_α , luego todos los objetos construidos tienen un nombre en $M^{\mathbb{P}_\alpha}$, es decir, podemos definir sucesiones de nombres $\{\Pi_\delta\}_{\delta \leq \lambda}$, $\{\rho_\delta\}_{\delta < \lambda}$, $\{\iota_\delta\}_{\delta < \lambda}$ y $\{\phi_\delta\}_{\delta < \lambda}$ (que a su vez permiten definir nombres para las sucesiones correspondientes, por ejemplo, $\Pi = \{(p.o.(\check{\delta}, \Pi_\delta), \mathbf{1}) \mid \delta < \lambda\}$, etc.) de modo que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\alpha}$ fuerce a que $(\{\Pi_\delta\}_{\delta \leq \lambda}, \{\rho_\delta\}_{\delta < \lambda})$ es la iteración que hemos definido, que $\iota_\delta : \mathbb{P}_{\alpha+\delta}/\Gamma \longrightarrow \Pi_\delta$ es la inmersión densa que hemos definido (para $\delta < \lambda$) y que $\Phi_\delta : \hat{\rho}_\delta \longrightarrow \check{\pi}_{\alpha+\delta}$ es la aplicación “traductora”.

Tomemos ahora $p' \in \mathbb{P}'_\lambda$ y sea $p' = \sigma_{G_\alpha}$ de modo que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \sigma \in \Pi_\lambda$. Como $\text{sop } p' \subset \lambda$ es numerable, el teorema 10.11 nos da que existe $F_0 \in M$ numerable ^{M} tal que $\text{sop } p' \subset F_0 \cap \lambda$. Sea $F = \{\alpha + \delta \mid \delta \in F_0 \cap \lambda\}$. Así $F \in M$ y $\text{sop } p' \subset \{\delta \in \lambda \mid \alpha + \delta \in F\}$.

Ahora definimos $p \in \mathbb{P}_{\alpha+\lambda}$ estableciendo que $p(\gamma) = \mathbf{1}_{\pi_\gamma}$ si $\gamma \notin F$ y, en el caso en que $\gamma \in F$, podemos expresar $\gamma = \alpha + \delta$ y definimos $p(\gamma) \in \hat{\pi}_\gamma$ tal que

$$\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\gamma} \Vdash p(\gamma) = i_{\alpha\gamma}(\Phi)_\delta(i_{\alpha\gamma}(\sigma)(\check{\delta}))_\Gamma.$$

Esto tiene sentido, pues si G_γ es un filtro \mathbb{P}_γ -genérico sobre M , entonces

$$(i_{\alpha\gamma}(\Phi)_\delta(i_{\alpha\gamma}(\sigma)(\check{\delta}))_\Gamma)_{G_\gamma} = (i_{\alpha\gamma}(\Phi)_\delta(i_{\alpha\gamma}(\sigma)(\check{\delta}))_{G_\gamma})_{G_\gamma} = F_\delta(p'(\delta))_{G_\gamma} \in \pi_\gamma.$$

Por lo tanto,

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\gamma} \Vdash i_{\alpha\gamma}(\Phi)_{\check{\delta}}(i_{\alpha\gamma}(\sigma)(\check{\delta}))_\Gamma \in \pi_\gamma$$

y existe un nombre $p(\gamma) \in \hat{\pi}_\gamma$ que cumple lo pedido.

Claramente $\text{sop } p \subset F$ es numerable^M, luego $p \in \mathbb{P}_{\alpha+\lambda}$. Además $p|_\alpha = \mathbb{1}$, luego $p \in \mathbb{P}_{\alpha+\lambda}/G_\alpha$. Ahora tenemos que probar que $j_{\alpha\lambda}(p) \leq p'$. Para ello probamos inductivamente que para todo $\delta < \lambda$ se cumple $j_{\alpha\lambda}(p)|_\delta \leq p'|_\delta$.

Esto vale trivialmente para $\delta = 0$. Si vale para δ , entonces hay que comprobar que

$$j_{\alpha\lambda}(p)|_\delta \Vdash j_{\alpha\lambda}(p)(\delta) \leq p'(\delta).$$

En realidad probaremos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}'_\delta} \Vdash j_{\alpha\lambda}(p)(\delta) = p'(\delta)$. Si $\gamma = \alpha + \delta \notin F$, el resultado es trivial, pues ambos miembros de la igualdad valen $\mathbb{1}_{\pi'_\delta}$. Suponemos, pues que $\gamma \in F$ y sea G'_δ un filtro \mathbb{P}'_δ -genérico sobre $M[G_\alpha]$. Entonces $G_\gamma = j_{\alpha\delta}^{-1}[G'_\delta]$ es un filtro $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$, luego también un filtro \mathbb{P}_γ -genérico sobre M que se restringe a G_α . Según la construcción de $j_{\alpha\lambda}(p)(\delta)$ dada en la prueba de 8.31, tenemos que

$$\begin{aligned} j_{\alpha\lambda}(p)(\delta)_{G'_\delta} &= (j_{\alpha,\delta+1}(p|_{\gamma+1})(\delta))_{G'_\delta} = \overline{p(\gamma)}_{G'_\delta} \\ &= p(\gamma)_{G_\gamma} = F_\delta(p'(\delta))_{G_\gamma} = p'(\delta)_{G'_\delta}. \end{aligned}$$

Esto implica que $j_{\alpha\lambda}(p)|_{\delta+1} \leq p'|_{\delta+1}$. Es caso de ordinales límite es trivial.

Con esto tenemos probado que $j_{\alpha\lambda}$ tiene imagen densa. Falta probar que es una inmersión. Es inmediato que $p \leq q \rightarrow j_{\alpha\lambda}(p) \leq j_{\alpha\lambda}(q)$. Falta probar que $p \perp q \rightarrow j_{\alpha\lambda}(p) \perp j_{\alpha\lambda}(q)$, pues el argumento dado en 8.31 usaba la finitud de los soportes.

Supongamos que $j_{\alpha\lambda}(p)$ y $j_{\alpha\lambda}(q)$ son compatibles. Entonces, por la densidad que hemos probado, existe una condición $r \in \mathbb{P}_{\alpha+\lambda}/G_\alpha$ tal que $j_{\alpha\lambda}(r) \leq j_{\alpha\lambda}(p)$ y $j_{\alpha\lambda}(r) \leq j_{\alpha\lambda}(q)$. Sea G un filtro $\mathbb{P}_{\alpha+\lambda}/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ tal que $r \in G$. Entonces G es también un filtro $\mathbb{P}_{\alpha+\lambda}$ -genérico sobre M . Para cada $\delta < \lambda$ tenemos que $G_{\alpha+\delta}$ es $\mathbb{P}_{\alpha+\delta}/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$, luego podemos considerar el filtro $G'_\delta = j(G_{\alpha+\delta})$ en \mathbb{P}'_δ dado por 4.40. Entonces, como $r|_{\alpha+\delta} \in G_{\alpha+\delta}$, también $j_{\alpha\delta}(r|_{\alpha+\delta}) = j_{\alpha\lambda}(r)|_\delta \in G'_\delta$, luego también $j_{\alpha\lambda}(p)|_\delta = j_{\alpha\delta}(p|_{\alpha+\delta}) \in G'_\delta$ y, como $G_{\alpha+\delta} = j_{\alpha\delta}^{-1}[G'_\delta]$, obtenemos que $p|_{\alpha+\delta} \in G_{\alpha+\delta}$, para todo $\delta < \lambda$, luego el teorema 8.25 nos da que $p \in G$, e igualmente $q \in G$, luego $\neg p \perp q$.

Con esto queda probado que $j_{\alpha\lambda}$ es una inmersión, y ya hemos visto que es densa. ■

Nota En las condiciones del teorema anterior es claro que, en $M[G_\alpha]$, se cumple que $\mathbb{1}_\delta \Vdash \pi'_\delta$ es propio y separativo, luego el teorema 10.21 nos da que cada \mathbb{P}'_δ es propio y separativo. En particular, teniendo en cuenta 8.28, si G es un filtro \mathbb{P}_γ -genérico sobre M , entonces $M[G]$ es una extensión genérica de $M[G_\alpha]$ a partir de \mathbb{P}'_β , que es un c.p.o. propio. ■

10.4 Conservación de $\mathcal{P}\omega$

Ya sabemos que si \mathbb{P} es un c.p.o. propio entonces $\mathbf{1} \Vdash \aleph_1 = \check{\aleph}_1$, es decir, \aleph_1 se conserva en toda extensión genérica propia. Ahora vamos a estudiar dar una condición necesaria y suficiente para que un c.p.o. propio conserve $\mathcal{P}\omega$, es decir, que cumpla $\mathbf{1} \Vdash \mathcal{P}\omega = \check{\mathcal{P}}\omega$ o, lo que es lo mismo, que las extensiones propias de un modelo M tengan los mismos subconjuntos de ω que M . Conviene observar algunas equivalencias de esta propiedad:

Teorema 10.27 *Sea M un modelo transitivo de ZFC, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Las afirmaciones siguientes son equivalentes:*

- a) $(\mathcal{P}\omega)^{M[G]} = (\mathcal{P}\omega)^M$.
- b) Si $A \in M[G]$ y $A \subset B \in M$ con B numerable M entonces $A \in M$.
- c) $H(\aleph_1)^{M[G]} = H(\aleph_1)^M$.

DEMOSTRACIÓN: a) \Rightarrow b) Sea $f : \omega \longrightarrow B$ biyectiva tal que $f \in M$. Entonces $f^{-1}[A] \in (\mathcal{P}\omega)^{M[G]} = (\mathcal{P}\omega)^M$, luego $f^{-1}[A] \in M$, luego $A \in M$.

b) \Rightarrow c) Claramente $H(\aleph_1)^M \subset H(\aleph_1)^{M[G]}$, pues si $x \in M$ tiene clausura transitiva numerable M , lo mismo vale en $M[G]$. La inclusión opuesta la demostramos por \in -inducción. Tomamos $x \in H(\aleph_1)^{M[G]}$ y podemos suponer que $\text{ct } x \subset M$. Sea $f : \omega \longrightarrow \text{ct } x \cup \{x\}$ biyectiva, con $f \in M[G]$. Sea $R \subset \omega \times \omega$ tal que $f : (\omega, R) \longrightarrow (\text{ct } x \cup \{x\}, \in)$ sea un isomorfismo. Por b) tenemos que $R \in M$, luego $\text{ct } x \cup \{x\} \in M$ (por ser el colapso transitivo de (ω, R)), luego $x \in M$.

c) \Rightarrow a) es trivial. ■

Definición 10.28 Sea κ un cardinal regular no numerable, sea $N \prec H(\kappa)$ un submodelo elemental numerable y sea $\mathbb{P} \in N$ un c.p.o. diremos que una condición $p \in \mathbb{P}$ es *completamente (N, \mathbb{P}) -genérica* si el filtro $G_p = \{q \in \mathbb{P} \mid p \leq q\}$ es (N, \mathbb{P}) -genérico, es decir, si, llamando $\phi : N \longrightarrow \bar{N}$ al colapso transitivo de N y $\bar{\mathbb{P}} = \phi(\mathbb{P})$, se cumple que $\bar{G}_p = \phi[G_p \cap N]$ es un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} .

Recordemos que una caracterización más elemental es que si $D \in N$ es predenso (o denso, o abierto denso) entonces $G_p \cap N \cap D \neq \emptyset$.

Equivalentemente, para que p sea completamente (N, \mathbb{P}) -genérica basta con que exista un filtro (N, \mathbb{P}) -genérico G acotado inferiormente por p , pues esto equivale a que $G \subset G_p$, con lo que $\bar{G} \subset \bar{G}_p$, y entonces \bar{G}_p cumple las condiciones del teorema 4.24, luego² \bar{G}_p es un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} y p es completamente (N, \mathbb{P}) -genérica. Más aún, $\bar{G}_p = \bar{G}$, por el teorema 4.19.

²El punto crucial es que dos condiciones de $G_p \cap N$ son compatibles, luego son compatibles en N , aunque no podamos asegurar en principio que tienen una extensión en $G_p \cap N$, luego las condiciones de \bar{G}_p son compatibles dos a dos.

Por otra parte, si p es completamente (N, \mathbb{P}) -genérica en particular es (N, \mathbb{P}) -genérica, pues (relativizando todo lo anterior a un modelo transitivo M de ZFC), si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$, entonces $G_p \subset G$, y, como todo $D \in N$ denso en \mathbb{P} corta a $G_p \cap N$, también corta a $G \cap N$, luego G es (N, \mathbb{P}) -genérico.

Observemos también que si $q \leq p$ y p es completamente (N, \mathbb{P}) -genérica entonces q también lo es. De hecho, $G_p \subset G_q$, luego $\bar{G}_p \subset \bar{G}_q$ y concluimos que \bar{G}_q es también $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico. Más aún, como antes concluimos que $\bar{G}_p = \bar{G}_q$.

Diremos que un c.p.o. \mathbb{P} es *completamente propio* si satisface la definición 10.9 de c.p.o. propio con condiciones completamente (N, \mathbb{P}) -genéricas en lugar de meramente (N, \mathbb{P}) -genéricas.

Puesto que toda condición completamente (N, \mathbb{P}) -genérica es (N, \mathbb{P}) -genérica, es obvio que todo c.p.o. completamente propio es propio.

Teorema 10.29 *Un c.p.o. propio y separativo es completamente propio si y sólo si³ conserva $\mathcal{P}\omega$.*

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Sea $\mathbb{P} \in M$ completamente propio y supongamos que existe un filtro genérico G y un $x \in (\mathcal{P}\omega)^{M[G]} \setminus (\mathcal{P}\omega)^M$. Pongamos que $x = \sigma_G$ y sea $p \in G$ tal que $p \Vdash \sigma \subset \omega \wedge \sigma \notin \check{M}$.

Fijemos un cardinal κ suficientemente grande para que se aplique la definición de c.p.o. completamente propio y de modo que $\mathbb{P}, \sigma \in H(\kappa)^M$ y sea $N \prec H(\kappa)^M$ un submodelo elemental numerable^M tal que $\mathbb{P}, p, \sigma \in N$. Por hipótesis existe $q \leq p$ completamente (N, \mathbb{P}) -genérica.

Para cada $n \in \omega$, es claro que

$$D_n = \{d \in \mathbb{P} \mid d \Vdash \check{n} \in \sigma \vee d \Vdash \check{n} \notin \sigma\} \in N$$

es abierto denso en \mathbb{P} , luego existe $d \in D_n \cap N \cap G_q$, y entonces $q \leq d$, luego $q \in D_n$, para todo $n \in \omega$. Así, si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$, resulta que

$$\sigma_G = \{n \in \omega \mid q \Vdash \check{n} \in \sigma\} \in M,$$

contradicción.

Para probar la implicación opuesta tomamos, siempre en M , un cardinal regular κ suficientemente grande tal que $\mathbb{P} \in H(\kappa)^M$, sea $N \prec H(\kappa)^M$ tal que $\mathbb{P} \in N$ y sea $p \in \mathbb{P} \cap N$. Por hipótesis podemos tomar una condición $p_0 \leq p$ que sea (N, \mathbb{P}) -genérica. Tomemos ahora un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p_0 \in G$. Entonces $G \cap N \in M[G]$ y está contenido en N , que es numerable^M, luego por 10.27 tenemos que $X = G \cap N \in M$.

Podemos tomar $q \in G$ tal que $q \leq p_0 \leq p$ y $q \Vdash \Gamma \cap \check{N} = \check{X}$. Ahora usamos que \mathbb{P} es separativo para concluir que si $x \in X$, entonces $q \Vdash \check{x} \in \Gamma$, luego $q \leq x$,

³Conviene observar que la prueba de que los c.p.o.s completamente propios conservan $\mathcal{P}\omega$ no requiere la hipótesis de separatividad

luego $G \cap N = X \subset G_q \cap N$, luego $\bar{G} \subset \bar{G}_q$, pero \bar{G} es un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} porque $p_0 \in G$, luego \bar{G}_q también lo es (por 4.24), luego q es completamente (N, \mathbb{P}) -genérica. ■

Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y, en M , sea κ un cardinal regular no numerable, sea $N \prec H(\kappa)^M$ numerable, sea $\mathbb{P} \in H(\kappa)^M$ y sea $p \in \mathbb{P}$ una condición completamente (N, \mathbb{P}) -genérica. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$. Entonces $G_p \subset G$ y $\bar{G}_p = \bar{G}$. Esto implica que el colapso transitivo $\phi : N \longrightarrow \bar{N}$ se extiende a $\phi : N[G] \longrightarrow N^*$, donde llamamos $N^* = \bar{N}[\bar{G}] = \bar{N}[G_p]$. Además

$$\phi(G) = \phi[G \cap N[G]] = \phi[G \cap N] = \bar{G}_p,$$

pues si $\phi(p) \in \phi[G \cap N[G]]$ entonces $\phi(p) \in \phi(\mathbb{P}) \in \bar{N}$, luego $\phi(p) \in \bar{N}$, luego $p \in N$. Notemos además que $N^* \in M$ es independiente de G . Usando el teorema 4.61 podemos obtener un nombre $\varphi \in M^\mathbb{P}$ tal que

$$p \Vdash \varphi : \check{N}[\Gamma] \longrightarrow \check{N}^* \text{ isomorfismo.}$$

Por el teorema de reflexión esto es cierto aun sin relativizar a un modelo M .

Teorema 10.30 *En las condiciones anteriores, supongamos además que $\pi \in N$ es un \mathbb{P} -nombre para un c.p.o. y sea $\sigma \in \hat{\pi}$. Entonces (p, σ) es completamente $\mathbb{P} * \pi$ -genérica sobre N si y sólo si:*

- a) *p es completamente \mathbb{P} -genérica sobre N, con lo que podemos considerar $\bar{\mathbb{Q}} = \phi(\pi)_{\bar{G}_p} \in N^*$.*
- b) *Existe un filtro $\bar{\mathbb{Q}}$ -genérico \bar{H} sobre N^* tal que $p \Vdash \sigma$ es una cota inferior de $\varphi^{-1}[\check{H}]$.*

En tal caso, $\bar{G}_{(p,\sigma)} = \bar{G}_p * \bar{H}$.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Supongamos que se cumplen a) y b). Entonces \bar{G}_p es un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre N (por a) y $\bar{G}_p * \bar{H}$ es un filtro $\bar{\mathbb{P}} * \bar{\pi}$ genérico sobre N , luego basta probar que $\bar{G}_{(p,\sigma)} = \bar{G}_p * \bar{H}$ para concluir que (p, σ) es completamente $(\mathbb{P} * \pi)$ -genérica. De hecho basta probar que $\bar{G}_p * \bar{H} \subset \bar{G}_{(p,\sigma)}$, pues 4.24 y la maximalidad de los filtros genéricos implica entonces la igualdad.

Tomemos $(\bar{q}, \bar{\tau}) \in \bar{G}_p * \bar{H}$, de modo que $\bar{q} = \phi(q)$, $\bar{\tau} = \phi(\tau)$, con $q \in G_p \cap N$ y $\tau \in N^\mathbb{P}$, luego en particular $p \leq q$. Fijemos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$. Entonces tenemos la función colapsante $\phi : N[G] \longrightarrow N^*$. Además $\mathbb{Q} = \pi_G \in N[G]$, $\bar{\mathbb{Q}} \in N^*$, $\phi(\mathbb{Q}) = \bar{\mathbb{Q}}$ y \bar{H} es un filtro $\bar{\mathbb{Q}}$ -genérico sobre N^* .

Por otra parte tenemos que $\phi(\tau_G) = \bar{\tau}_{\bar{G}_p} \in \bar{H}$ y por b) σ_G es una cota inferior de $\phi^{-1}[\bar{H}]$, luego $\sigma_G \leq \tau_G$. Con esto hemos probado que $p \Vdash \sigma \leq \tau$, luego $(p, \sigma) \leq (q, \tau)$, luego $(q, \tau) \in G_{(p,\sigma)} \cap N$, luego $(\bar{q}, \bar{\tau}) \in \bar{G}_{(p,\sigma)}$.

Ahora supongamos que (p, σ) es completamente $\mathbb{P} * \pi$ -genérica. Entonces $\bar{G}_{(p,\sigma)}$ es un filtro $\bar{\mathbb{P}} * \bar{\pi}$ -genérico sobre \bar{N} , luego $\bar{G}_{(p,\sigma)} = \bar{G}_0 * \bar{H}$, donde \bar{G}_0 es

un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} y \bar{H} es $\bar{\mathbb{Q}}$ -genérico sobre $\bar{N}[\bar{G}_0]$, donde $\bar{\mathbb{Q}} = \bar{\pi}_{\bar{G}_0}$. Vamos a probar que $\bar{G}_0 = \bar{G}_p$. De hecho basta probar que $\bar{G}_0 \subset \bar{G}_p$.

Sea $\bar{q} \in G_0$. Entonces $(\bar{q}, \mathbf{1}) \in \bar{G}_0 * \bar{H} = \bar{G}_{(p,\sigma)}$, luego $(\bar{q}, \mathbf{1}) = \phi(q, \mathbf{1})$, con $(q, \mathbf{1}) \in G_{(p,\sigma)} \cap N$, luego $\bar{q} = \phi(q)$, con $p \leq q$, luego $\bar{q} \in G_p$.

Esto prueba que \bar{G}_p es $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} , luego p es completamente \mathbb{P} -genérica y tenemos a). Para probar b) fijamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$. Entonces $G_p \subset G$, de donde $\bar{G}_p = \bar{G}$. Si $\tau_{\bar{G}} \in \phi^{-1}[\bar{H}]$, entonces $\bar{\tau}_{\bar{G}_p} = \phi(\tau_G) \in H$, luego $(\mathbf{1}, \bar{\tau}) \in \bar{G}_p * \bar{H} = \bar{G}_{(p,\sigma)}$, luego $(\mathbf{1}, \tau) \in G_{(p,\sigma)} \cap N$, luego $(p, \sigma) \leq (\mathbf{1}, \tau)$, luego $p \Vdash \sigma \leq \tau$, luego $\sigma_G \leq \tau_G$, luego σ_G es una cota inferior de $\phi^{-1}[H]$, y esto prueba b). ■

En general, la propiedad de ser completamente propio no se conserva al iterar extensiones, por lo que necesitamos introducir una propiedad más fuerte.

Definición 10.31 Un *sistema de completitud* es una función $\mathbb{D}(N, \mathbb{P}, p_0)$ definida cuando:

- a) N es un modelo transitivo numerable de ZFC–AP,
- b) $\mathbb{P} \in N$ es un c.p.o.,
- c) $p_0 \in \mathbb{P}$.

de manera que $\mathbb{D}(N, \mathbb{P}, p_0)$ es una familia no vacía de subconjuntos no vacíos del conjunto $\text{Gen}(N, \mathbb{P}, p_0)$ formado por los filtros \mathbb{P} -genéricos sobre N que contienen a p_0 .

Notemos que todo conjunto transitivo numerable está en $H(\aleph_1)$, luego el dominio de \mathbb{D} es un conjunto.

Si N es un modelo numerable (no necesariamente transitivo) de ZFC–AP, $\mathbb{P} \in N$ es un c.p.o. y $p_0 \in \mathbb{P} \cap N$, podemos considerar el colapso transitivo $\phi : N \longrightarrow \bar{N}$, $\bar{\mathbb{P}} = \phi(\mathbb{P})$ y $\bar{p}_0 = \phi(p_0)$. Si G es un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} tal que $\bar{p}_0 \in G$, entonces $p_0 \in \phi^{-1}[G] \subset N$, que no es necesariamente un filtro en \mathbb{P} , pero genera un filtro

$$G^* = \{p \in \mathbb{P} \mid \forall q \in \phi^{-1}[G] \ q \leq p\}.$$

Claramente $G^* \cap N = \phi^{-1}[G]$, luego $\phi[G \cap N] = G$. Por lo tanto, G^* es un filtro (N, \mathbb{P}) -genérico y $p_0 \in G^*$. Puesto que está definido $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$, para cada $X \in \mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ podemos definir $X^* = \{G^* \mid G \in X\}$ y

$$\mathbb{D}(N, \mathbb{P}, p_0) = \{X^* \mid X \in \mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)\}.$$

Así $\mathbb{D}(N, \mathbb{P}, p_0)$ es un conjunto no vacío de conjuntos no vacíos de filtros (N, \mathbb{P}) -genéricos que contienen a p_0 , y si el modelo N es transitivo, $\mathbb{D}(N, \mathbb{P}, p_0)$ es el mismo dado directamente por la función \mathbb{D} .

Diremos que un c.p.o. \mathbb{P} es \mathbb{D} -completo (respecto a un sistema de completitud prefijado \mathbb{D}) si para todo cardinal regular κ suficientemente grande y todo

submodelo elemental numerable $N \prec H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P} \in N$ y para toda condición $p_0 \in \mathbb{P} \cap N$ existe un $X \in \mathbb{D}(N, \mathbb{P}, p_0)$ tal que todo filtro $G \in X$ está acotado inferiormente en \mathbb{P} .

Notemos que una cota inferior de G será una condición completamente (N, \mathbb{P}) -genérica que extiende a p_0 , luego \mathbb{P} es completamente propio y, en particular, propio.

Diremos que un sistema de completitud \mathbb{D} es *numerablemente completo* si toda familia numerable de elementos de $\mathbb{D}(N, \mathbb{P}, p_0)$ tiene intersección no vacía.

Sea ahora \mathbb{P} un c.p.o., π un nombre para un c.p.o. y sea $\Delta \in V^{\mathbb{P}}$ tal que

$$\begin{aligned} \mathbb{1} \Vdash \Delta \in \check{V} &\text{ es un sistema de completitud numerablemente completo } \wedge \\ &\pi \text{ es completo respecto a } \Delta. \end{aligned}$$

Sea κ un cardinal regular no numerable y sean $N_0 \prec N_1 \prec H(\kappa)$ submodelos elementales numerables tales que $N_0 \in N_1$ y $\mathbb{P}, \pi, \Delta \in N_0$. Sea además G_0 un filtro (N_0, \mathbb{P}) -genérico tal que $G_0 \cap N_0 \in N_1$. Sea $p_0 = (a, \sigma) \in (\mathbb{P} * \pi) \cap N_0$ con $a \in G_0$. Vamos a definir un filtro $(N_0, \mathbb{P} * \pi)$ -genérico

$$G = \mathbb{E}(N_0, N_1, \mathbb{P} * \pi, G_0, p_0)$$

que contiene a p_0 .

Para ello fijamos el colapso transitivo $\phi : N_0 \longrightarrow \bar{N}_0$, así como $\bar{\mathbb{P}} = \phi(\mathbb{P})$, $\bar{\pi} = \phi(\pi)$, $\bar{\sigma} = \phi(\sigma)$, $\bar{\Delta} = \phi(\Delta)$ y consideramos $\bar{G}_0 = \phi[G_0 \cap M_0]$, que es un filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N}_0 . Entonces $\bar{Q} = \bar{\pi}_{\bar{G}_0} \in \bar{N}_0[\bar{G}_0]$ es un c.p.o., $\bar{q} = \bar{\sigma}_{\bar{G}_0} \in \bar{Q}$ y $\bar{\mathbb{D}} = \bar{\Delta}_{\bar{G}_0} \in \bar{N}_0$ es un sistema de completitud numerablemente completo en $\bar{N}_0[\bar{G}_0]$ respecto al cual \bar{Q} es $\bar{\mathbb{D}}$ -completo.

Observemos que $\bar{\mathbb{D}} = \phi(\mathbb{D})$, donde $\mathbb{D} \in N_0$ es un sistema de completitud numerablemente completo. Como $G_0 \cap N_0 \in N_1$, también $\bar{G}_0 \in N_1$, y a su vez $\bar{Q}, \bar{q}, \bar{\sigma} \in N_1$, luego $\mathbb{D}(\bar{N}_0, \bar{Q}, \bar{q}) \in N_1$. Como $N_1 \cap \mathbb{D}(\bar{N}_0, \bar{Q}, \bar{q})$ es numerable, la completitud numerable de \mathbb{D} implica que existe $\bar{G}_1 \in \bigcap(N_1 \cap \mathbb{D}(\bar{N}_0, \bar{Q}, \bar{q}))$. En particular \bar{G}_1 es un filtro \bar{Q} -genérico sobre \bar{N}_0 y $\bar{q} \in \bar{G}_1$. Podemos definir entonces $\bar{G} = \bar{G}_0 * \bar{G}_1$, que es un filtro $\bar{\mathbb{P}} * \bar{Q}$ -genérico sobre \bar{N}_0 , con lo que $G = \bar{G}^*$ es un filtro $(N_0, \mathbb{P} * \pi)$ -genérico que contiene a p_0 .

Nota Podemos definir una fórmula $\psi(N_0, N_1, \mathbb{P} * \pi, G_0, p_0)$ tal que

$$G = \mathbb{E}(N_0, N_1, \mathbb{P} * \pi, G_0, p_0) \leftrightarrow H(\kappa) \models \psi[N_0, N_1, \mathbb{P} * \pi, G_0, p_0],$$

aunque esto requiere algunas observaciones: En primer lugar, no es posible expresar en $H(\kappa)$ que $N_1 \prec H(\kappa)$, pero para que la construcción de G sea posible basta con que la definición de submodelo elemental se cumpla para un número finito de fórmulas, y esto sí que es expresable en $H(\kappa)$. Por otro lado, la elección de \bar{G}_1 requiere una función de elección. Podemos suponer que N_1 es en realidad un par (N_1, \leq) , donde \leq es un buen orden en N_1 y G_1 se elige mediante dicho buen orden. ■

Teorema 10.32 Sea \mathbb{P} un c.p.o. completamente propio y sean $\pi, \Delta \in V^\mathbb{P}$ tales que

$$\begin{aligned} 1 \Vdash \Delta \in \check{V} &\text{ es un sistema de completitud numerablemente completo } \wedge \\ \pi &\text{ es un c.p.o. completo respecto a } \Delta. \end{aligned}$$

Sea κ un cardinal regular no numerable y sean $N_0 \prec M_1 \prec H(\kappa)$ submodelos elementales numerables tales que $N_0 \in N_1$ y $\mathbb{P}, \pi, \Delta \in N_0$. Sea $q_0 \in \mathbb{P}$ una condición (N_1, \mathbb{P}) -genérica y completamente (N_0, \mathbb{P}) -genérica y sea $G_0 = G_{q_0}$. Sea $p_0 \in (\mathbb{P} * \pi) \cap N_0$ tal que $p_0 = (a, \sigma)$ con $a \in G_0$. Entonces existe $\tau \in \hat{\pi}$ tal que $(q_0, \tau) \leq p_0$ es completamente $(N_0, \mathbb{P} * \pi)$ -genérica. Más concretamente, (q_0, τ) acota inferiormente a $\mathbb{E}(N_0, N_1, \mathbb{P} * \pi, G_0, p_0)$.

DEMOSTRACIÓN: Trabajamos en un modelo transitivo numerable M de ZFC. Veamos primero que $G_0 \cap N_0 \in N_1$. Llamemos $R \subset \mathbb{P}$ al conjunto de todas las condiciones completamente (N_0, \mathbb{P}) -genéricas. Es claro que $R \in N_1$ y, por hipótesis, $q_0 \in R$. Que \mathbb{P} sea completamente propio equivale por definición a que R sea denso en \mathbb{P} y, como q_0 es (N_1, \mathbb{P}) -genérica, $N_1 \cap R$ es predenso bajo q_0 , luego q_0 es compatible con un $r \in N_1 \cap R$. Ahora bien, si $r' \leq r$ y $r' \leq q_0$ es completamente (N_0, \mathbb{P}) -genérica, tenemos que $\bar{G}_{q_0} = \bar{G}_{r'} = \bar{G}_r \in N_1$, luego también $G_0 \cap N_0 \in N_1$, pues es la antiimagen de \bar{G}_0 por la función colapsante $\phi : N_0 \longrightarrow \bar{N}_0$, que está en N_1 .

Por lo tanto, como G_0 es un filtro (N_0, \mathbb{P}) -genérico, está definido el filtro $\mathbb{E}(N_0, N_1, \mathbb{P} * \pi, G_0, p_0)$. Recordemos su definición:

Llamamos $N_0^* = \bar{N}_0[\bar{G}_0]$, $\bar{\mathbb{Q}} = \bar{\pi}_{\bar{G}_0}$, $\bar{q} = \bar{\sigma}_{\bar{G}_0} \in \bar{\mathbb{Q}}$, $\bar{\mathbb{D}} = \bar{\Delta}_{\bar{G}_0} \in \bar{N}_0$ y $\mathbb{D} = \phi^{-1}(\bar{\mathbb{D}}) \in N_0$. Ahora elegimos $\bar{G}_1 \in \bigcap(N_1 \cap \mathbb{D}(\bar{N}_0, \bar{\mathbb{Q}}, \bar{q}))$, formamos $\bar{G} = \bar{G}_0 * \bar{G}_1$ y finalmente pasamos a $G = \bar{G}^*$ (el filtro generado por $\phi^{-1}[\bar{G}]$).

Fijemos ahora un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q_0 \in H$, de modo que $\bar{H} = \bar{G}_0$, por lo que $\bar{\mathbb{Q}}, \bar{q}$, etc. siguen siendo los mismos. Según hemos visto antes del teorema 10.30, el colapso transitivo se extiende a $\phi : N_0[H] \longrightarrow N_0^*$.

Basta probar que $\phi^{-1}[\bar{G}_1]$ está acotado inferiormente en $\mathbb{Q} = \phi^{-1}(\bar{\mathbb{Q}})$. En tal caso, existe un $\tau \in \hat{\pi}$ tal que $q_0 \Vdash \tau$ es una cota inferior de $\varphi^{-1}[\bar{G}_1]$, luego el teorema 10.30 nos da que $\bar{G}_{(q_0, \tau)} = \bar{G}$, luego (q_0, τ) es completamente $(N_0, \mathbb{P} * \pi)$ -genérica y (q_0, τ) acota inferiormente a G . Además, como $\bar{q} \in \bar{G}_1$, se cumple que $q_0 \Vdash \tau \leq \sigma$, luego $(q_0, \tau) \leq p_0$.

Notemos que $\mathbb{Q} = \pi_H$ cumple $\phi(\mathbb{Q}) = \bar{\pi}_{\bar{H}} = \bar{\mathbb{Q}}$, luego es el mismo que ya teníamos definido. Igualmente $\mathbb{D} = \Delta_H$ es el mismo que ya teníamos definido, y por hipótesis \mathbb{Q} es \mathbb{D} -completo. Como $q = \sigma_H \in \mathbb{Q} \cap N_0$, existe un conjunto $X \in \mathbb{D}(N_0, \mathbb{Q}, q)$ tal que todos sus filtros están acotados inferiormente en \mathbb{Q} . Como $N_1[H] \prec H(\kappa)[H]$, podemos tomar $X \in N_1[H]$, pero como $\mathbb{D} \in M$, también $X \in M$, luego $X \in M \cap N_1[H] = N_1$ por 10.8, ya que q_0 es (N_1, \mathbb{P}) -genérica, luego H es (N_1, \mathbb{P}) -genérico.

Observemos ahora que, por la definición de la extensión de \mathbb{D} a modelos no transitivos, $X = X_0^*$, donde $X_0 \in \mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{q}) \cap N_1$, pues

$$X_0 = \{\phi[K \cap N_0] \mid K \in X\} \in N_1,$$

luego $\bar{G}_1 \in X_0$, luego $\bar{G}_1^* \in X$, luego \bar{G}_1^* y, en particular, $\phi^{-1}[\bar{G}_1]$ está acotado inferiormente en \mathbb{Q} . ■

Para generalizar este resultado a extensiones iteradas infinitas necesitamos generalizar la definición de \mathbb{E} :

Consideremos una iteración de preórdenes separativos $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ con soportes numerables, de modo que, para cada $\delta < \gamma$,

$\mathbb{I}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \forall \mathbb{D} \in \check{V}(\mathbb{D} \text{ es un sistema de completitud numerablemente completo}$

$\wedge \pi_\delta \text{ es } \mathbb{D}\text{-completo}).$

Fijemos un cardinal no numerable κ suficientemente grande. Vamos a definir una función $\mathbb{E}(N_0, N, \mathbb{P}_\gamma, G_0, p_0)$, definida para los argumentos siguientes:

- a) $N_0 \prec H(\kappa)$ numerable, $\gamma, \mathbb{P}_\gamma \in N_0$, $p_0 \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_0$.
- b) $N = \{N_\delta\}_{\delta \leq \alpha}$ es una torre en $H(\kappa)$ tal que N_0 es el anterior.
- c) Existe $\gamma_0 \in N_0 \cap \gamma$ tal que G_0 es un filtro $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérico, $p_0|_{\gamma_0} \in G_0$ y $G_0 \in N_1$.
- d) α es el ordinal de $N_0 \cap [\gamma_0, \gamma[$.

En estas condiciones, $\mathbb{E}(N_0, N, \mathbb{P}_\gamma, G_0, p_0)$ será un filtro (N_0, \mathbb{P}_γ) -genérico G_γ tal que $p_0 \in G_\gamma$ y las restricciones a γ_0 de las condiciones de G_γ están en G_0 .

Definimos \mathbb{E} por recursión sobre $\alpha < \omega_1$. Notemos que la condición d) (junto con que $\gamma_0 < \gamma$) implica que $\alpha > 0$. Supongamos en primer lugar que $\alpha = \alpha^* + 1$. Entonces la condición d) implica que $\gamma = \gamma^* + 1$. Consideremos primero el caso $\alpha = 1$, que equivale a $\gamma^* = \gamma_0$. Entonces tenemos únicamente dos submodelos N_0 y N_1 y, como $\mathbb{P}_\gamma \cong \mathbb{P}_{\gamma_0} * \pi_{\gamma_0}$, basta tomar

$$G_\gamma = \mathbb{E}(N_0, N_1, \mathbb{P}_{\gamma_0} * \pi_{\gamma_0}, G_0, p_0).$$

Supongamos ahora que $\gamma_0 < \gamma^*$ y sea $N^{\alpha^*} = \{N_\delta\}_{\delta \leq \alpha^*}$. Entonces tenemos definido $G_{\gamma^*} = \mathbb{E}(N_0, N^{\alpha^*}, \mathbb{P}_{\gamma^*}, G_0, p_0|_{\gamma^*})$, que es un filtro $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma^*})$ -genérico que extiende a G_0 y contiene a $p|_{\gamma^*}$. Más aún, podemos suponer que se cumple $G_{\gamma^*} \in N_\alpha$. En efecto, en principio podemos definir G_γ trivialmente en el caso en que $G_{\gamma^*} \notin N_\alpha$, pero el resultado final será una fórmula $G_\gamma = \mathbb{E}(N_0, N, \mathbb{P}_\gamma, G_0, p_0)$ que puede relativizarse a $H(\kappa)$ (en virtud de las mismas observaciones que hemos hecho sobre la definición de \mathbb{E} para $\alpha = 1$), y entonces podemos usar que $N_\alpha \prec H(\kappa)$ (junto con el hecho de que N_α contiene todos los parámetros de la definición de G_{γ^*}) para concluir que $G_{\gamma^*} \in N_\alpha$, por lo que G_γ cumplirá realmente este caso de la definición.

Definimos entonces

$$G_\gamma = \mathbb{E}(N_0, N_\alpha, \mathbb{P}_{\gamma^*} * \pi_{\gamma^*}, G_{\gamma^*}, p_0).$$

Es fácil ver que cumple todo lo requerido.

Supongamos, por último, que α es un ordinal límite y sea⁴ $\{\alpha_n\}_{n<\omega} \in N_0$ una sucesión cofinal creciente en α con $\alpha_0 = 0$. Llamemos $\{\gamma_n\}_{n<\omega} \in N_0$ a la sucesión creciente dada por $\gamma_n = \gamma_0 + \alpha_n$. Notemos que, como $\alpha_n \in N_0$ es numerable, de hecho, $\alpha_n \subset N_0$, de donde $N_0 \cap [\gamma_0, \gamma_n] = [\gamma_0, \gamma_n]$ y así α_n es el ordinal de $N_0 \cap [\gamma_0, \gamma_n]$. En particular $\gamma_n \leq \gamma_{n+1} \leq \gamma$. Sea $\{D_n\}_{n<\omega}$ una enumeración de todos los conjuntos densos en \mathbb{P}_γ que están en N_0 .

Vamos a definir recurrentemente dos sucesiones $\{p_n\}_{n<\omega}$ y $\{G_n\}_{n<\omega}$ de modo que $p_n \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_0$ y $G_n \in N_{\alpha_n+1}$ es un filtro $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérico tal que:

- a) G_0 y p_0 son los dados, y $p_n|_{\gamma_n} \in G_n$.
- b) $p_{n+1} \leq p_n$ y $p_{n+1} \in D_n$.

Supuestos definidos p_n y G_n , por el teorema 10.19 aplicado al colapso transitivo de N_0 existe $p_{n+1} \in D_n \cap N_0$ tal que $p_{n+1} \leq p_n$ y $p_{n+1}|_{\gamma_n} \in G_n$. Entonces podemos definir la torre N^n cuyo primer término es N_0 y los siguientes son los N_δ con $\alpha_n + 1 \leq \delta \leq \alpha_{n+1}$ y a partir de ella

$$G_{n+1} = \mathbb{E}(N_0, N^n, \mathbb{P}_{\gamma_{n+1}}, G_n, p_{n+1}|_{\gamma_{n+1}}).$$

Ahora basta definir G_γ como el filtro generado por las condiciones p_n . Obviamente es (N_0, \mathbb{P}_γ) -genérico, contiene a p_0 y extiende a G_0 , pues por construcción cada G_{n+1} extiende a G_n , luego todos extienden a G_0 . Por lo tanto, si $p \in G_\gamma$ existe un n tal que $p_{n+1} \leq p$, luego $p_{n+1}|_{\gamma_n} \leq p|_{\gamma_n} \in G_n$, luego $p|_{\gamma_0} \in G_0$.

Teorema 10.33 *Sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables tal que, para cada $\delta < \gamma$:*

- a) $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es $\check{\alpha}$ -propio y separativo, para todo $\alpha < \omega_1$,
- b) $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \forall \mathbb{D} \in \check{V}(\mathbb{D} \text{ es un sistema de completitud numerablemente completo} \wedge \pi_\delta \text{ es } \mathbb{D}\text{-completo}),$
- c) \mathbb{P}_δ es completamente propio.

Sea κ un cardinal regular suficientemente grande y $N = \{N_\delta\}_{\delta \leq \alpha}$ una torre de longitud $\alpha + 1$ en $H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P}_\gamma \in N_0$, sea $p_0 \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_0$ y $\gamma_0 \in \gamma \cap N_0$, de modo que α es el ordinal de $N_0 \cap [\gamma_0, \gamma]$. Entonces:

Para cada condición $q_0 \in \mathbb{P}_{\gamma_0}$ completamente $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica y $(N, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica tal que $q_0 \leq p_0|_{\gamma_0}$, existe una condición completamente (N_0, \mathbb{P}_γ) -genérica q tal que $q|_{\gamma_0} = q_0$, $q \leq p_0$. De hecho, q acota inferiormente al filtro $\mathbb{E}(N_0, N, \mathbb{P}_\gamma, G_0, p_0)$, donde $G_0 = G_{q_0}$.

DEMOSTRACIÓN: Como q_0 es $(N_1, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica, el mismo argumento empleado al principio de la prueba del teorema 10.32 demuestra que $G_0 \cap N_0 \in N_1$. Probamos el teorema por inducción sobre $\alpha > 0$ (el ordinal de $N_0 \cap [\gamma_0, \gamma]$). Suponemos en primer lugar que $\alpha = \alpha^* + 1$, lo que a su vez implica que $\gamma = \gamma^* + 1$. Más aún, supongamos de momento que $\alpha^* > 0$, con lo que $\gamma_0 < \gamma^*$.

⁴Suponemos que N_0 es en realidad un par (N_0, \leq) , donde \leq es un buen orden, y $\{\alpha_n\}_{n<\omega}$ se elige mediante dicho buen orden.

Sea $X \subset \mathbb{P}_{\gamma_0}$ una anticadena maximal entre las que cumplen las propiedades siguientes:

- a) todo $r \in X$ acota inferiormente a $G_0 \cap N_0$,
- b) todo $r \in X$ es $(N|_\alpha, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérico.

Podemos exigir que $X \in N_\alpha$, y es predenso bajo q_0 , pues toda $t \leq q_0$ cumple las dos condiciones anteriores, luego es compatible con un elemento de X . Para cada $r_0 \in X$, podemos aplicar la hipótesis de inducción a la iteración $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma^*}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma^*})$ y la torre $N|_\alpha$, con $p_0|_{\gamma^*}$ y $q_0 = r_0$. (Notemos que tenemos $p_0|_{\gamma_0} \in G_0 \cap N_0$, luego $r_0 \leq p_0|_{\gamma_0}$.) La conclusión es que existe $r_1 \in \mathbb{P}_{\gamma^*}$ tal que $r_1|_{\gamma_0} = r_0$, $r_0 \leq p_0|_{\gamma^*}$ y r_1 acota inferiormente al filtro $G_{\gamma^*} = \mathbb{E}(N_0, N|_\alpha, \mathbb{P}_{\gamma^*}, G_0, p_0|_{\gamma^*})$. Como todos los parámetros están en N_α , se cumple que $G_{\gamma^*} \in N_\alpha$, luego si $r_0 \in X \cap N_\alpha$ podemos elegir $r_1 \in N_\alpha$.

Aplicamos ahora el teorema 4.60 (generalizado a V en lugar de M por el teorema de reflexión), que nos da un $\sigma_0 \in V^{\mathbb{P}_{\gamma_0}}$ tal que cada $r_0 \in X$ cumple $r_0 \Vdash \sigma_0 = \check{r}_1$. De aquí se sigue que

$$q_0 \Vdash \sigma_0 \in \check{\mathbb{P}}_{\gamma^*} \cap \check{N}_\alpha \wedge \sigma_0|_{\tilde{\gamma}_0} \in \Gamma.$$

En efecto, el conjunto

$$D = \{s \in \mathbb{P}_{\gamma_0} \mid s \in X \vee \bigwedge r \in X \ s \perp r\} \in N_\alpha$$

es claramente predenso en \mathbb{P}_{γ_0} y, relativizando todo lo anterior a un modelo transitivo numerable M de ZFC, tenemos que si G es un filtro \mathbb{P}_{γ_0} -genérico sobre M tal que $q_0 \in G$, entonces existe $r_0 \in D \cap N_\alpha \cap G$, por el teorema 10.6, ya que G es $(N_\alpha, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérico porque q_0 es $(N_\alpha, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica, luego existe $s \in G$ tal que $s \leq q_0$, $s \leq r_0$, luego s es compatible con un elemento de X , luego r_0 también, luego $r_0 \in X$ por definición de D . En definitiva, $r_0 \in X \cap N_\alpha \cap G$, luego $\sigma_0|_G = r_1 \in \mathbb{P}_{\gamma^*} \cap N_\alpha$. Además, $\sigma_0|_{\gamma_0} = r_1|_{\gamma_0} = r_0 \in G$.

Con esto estamos en las hipótesis del teorema 10.20, luego podemos concluir que existe una condición $(N_\alpha, \mathbb{P}_{\gamma^*})$ -genérica q_1 de manera que $q_1|_{\gamma_0} = q_0$ y $q_1 \Vdash i_{\gamma_0 \gamma^*}(\sigma_0) \in \Gamma$.

Además q_1 acota inferiormente a G_{γ^*} , pues si $t \in G_{\gamma^*}$, tomamos un filtro \mathbb{P}_{γ^*} -genérico sobre M con $q_1 \in G$, y entonces $G' = i_{\gamma_0 \gamma^*}^{-1}[G]$ es \mathbb{P}_{γ_0} -genérico sobre M con $q_0 \in G'$, luego hemos visto que existe un $r_0 \in X \cap N_\alpha \cap G$, de modo que $i_{\gamma_0 \gamma^*}(\sigma_0)|_G = \sigma_0|_{G'} = r_1 \leq t$ y $i_{\gamma_0 \gamma^*}(\sigma_0)|_G \in G$, luego $t \in G$, luego concluimos que $q_1 \Vdash \check{t} \in \Gamma$, luego $q_1 \leq t$.

Hasta aquí habíamos supuesto que $\alpha^* > 0$. Ahora observamos que en el caso en que $\alpha^* = 0$ y, por lo tanto, $\gamma^* = \gamma_0$, lo que hemos obtenido se cumple trivialmente tomando $G_{\gamma^*} = G_0$, $\sigma_0 = q_0$ y $q_1 = q_0$. Por lo tanto, a partir de aquí la prueba vale tanto si $\alpha^* = 0$ como si no.

Ahora basta aplicar el teorema 10.32 a los objetos siguientes:

$$\begin{array}{ccccccc} \mathbb{P} & \pi & N_0 & N_1 & q_0 & a \\ \mathbb{P}_{\gamma^*} & \pi_{\gamma^*} & N_0 & N_\alpha & q_1 & p_0|_{\gamma^*} \end{array}$$

El resultado es que existe una condición completamente (N_0, \mathbb{P}_γ) -genérica q tal que $q \leq p_0$, $q|_{\gamma^*} = q_1$ (luego $q|_{\gamma_0} = q_0$) que acota inferiormente al filtro $\mathbb{E}(N_0, N_\alpha, \mathbb{P}_\gamma, G_{q_1}, p_0)$. Ahora basta probar que este filtro coincide con $\mathbb{E}(N_0, N, \mathbb{P}_\gamma, G_0, p_0)$. Éste es por construcción $\mathbb{E}(N_0, N_\alpha, \mathbb{P}_\gamma, G_{\gamma^*}, p_0)$, pero tenemos que $G_{\gamma^*} \subset G_{q_1}$ y, como ambos son $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma^*})$ -genéricos, se cumple que $N_0 \cap G_{\gamma^*} = N_0 \cap G_{q_0}$ y la definición de \mathbb{E} sólo depende de esta intersección.

Ahora suponemos que α es un ordinal límite y seguimos la definición del filtro $G_\gamma = \mathbb{E}(N_0, N, \mathbb{P}_\gamma, G_0, p_0)$, que depende de una sucesión $\{\alpha_n\}_{n \in \omega} \in N_0$ cofinal creciente en α , que a su vez determina las sucesiones $\{\gamma_n\}_{n \in \omega}$, $\{p_n\}_{n \in \omega}$ y $\{G_n\}_{n \in \omega}$, de modo que G_γ es el filtro generado por las condiciones p_n .

Ahora vamos a definir una sucesión $\{q_n\}_{n \in \omega}$ de modo que se cumpla lo siguiente:

- a) q_n acota inferiormente a G_n ,
- b) $q_n \leq p_n|_{\gamma_n}$,
- c) $q_{n+1}|_{\gamma_n} = q_n$,
- d) q_n es $(\{N_\delta\}_{\alpha_n+1 \leq \delta \leq \alpha}, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica.

Notemos que la primera condición implica que la condición q_n es completamente $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica.

Partimos del q_0 dado por el enunciado, que cumple todo lo requerido. Supongamos definido q_n . Sea $X \subset \mathbb{P}_{\gamma_n}$ una anticadena maximal entre las que cumplen las propiedades siguientes:

- a) Si $r \in X$ entonces r acota inferiormente a $G_n \cap N_0$,
- b) Toda $r \in X$ es $(\{N_\delta\}_{\alpha_n+1 \leq \delta \leq \alpha_{n+1}}, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica.

Podemos elegir $X \in N_{\alpha_{n+1}+1}$ y es claramente predenso bajo q_n . Para cada $r_0 \in X$ podemos aplicar la hipótesis de inducción a $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma_{n+1}}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma_{n+1}})$ y la torre que empieza por N_0 y sigue con $\{N_\delta\}_{\alpha_n+1 \leq \delta \leq \alpha_{n+1}}$. Tomamos $p_{n+1}|_{\gamma_{n+1}}$ en lugar de p_0 , γ_n en lugar de γ_0 y r_0 en lugar de q_0 .

Observemos que $p_{n+1}|_{\gamma_{n+1}} \in G_{n+1}$, luego $p_{n+1}|_{\gamma_n} \in G_n \cap N_0$ (por construcción de \mathbb{E}), luego $r_0 \leq p_{n+1}|_{\gamma_n}$. La conclusión es que existe una condición completamente $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma_{n+1}})$ -genérica r_1 tal que $r_1|_{\gamma_n} = r_0$ y que acota inferiormente a G_{n+1} . Además, si $r_0 \in X \cap N_{\alpha_{n+1}+1}$ podemos tomar $r_1 \in N_{\alpha_{n+1}+1}$.

Notemos que estamos imitando el argumento de la primera parte de la prueba. Como allí, ahora podemos obtener un nombre $\sigma_0 \in V^{\mathbb{P}_{\gamma_n}}$ tal que cada $r_0 \in X$ cumple $r_0 \Vdash \sigma_0 = \check{r}_1$. A su vez, esto implica que

$$q_n \Vdash \sigma_0 \in \check{\mathbb{P}}_{\gamma_n} \cap \check{N}_{\alpha_{n+1}+1} \wedge \sigma_0|_{\tilde{\gamma}_n} \in \Gamma \wedge \sigma_0 \text{ acota a } \check{G}_{n+1}.$$

Ahora podemos aplicar el teorema 10.24 con la torre $\{N_\delta\}_{\alpha_{n+1}+1 \leq \delta \leq \alpha}$, lo que nos da una condición q_{n+1} que cumple las condiciones c) y d) y además

$q_{n+1} \Vdash i_{\gamma_n \gamma_{n+1}}(\sigma_0) \in \Gamma$. Esto implica que q_{n+1} acota a G_{n+1} (pues si $p \in G_{n+1}$ entonces $q_{n+1} \Vdash \check{p} \in \Gamma$), con lo que tenemos a), que trivialmente implica b).

Finalmente definimos $q^* = \bigcup_n q_n$ y $q = i_{\gamma^* \gamma}(q^*) \in \mathbb{P}_\gamma$, donde $\gamma^* = \sup_n \gamma_n$. Así $q|_{\gamma_0} = q_0$ y, como $q_n \leq p_n|_{\gamma_n} \leq p_m|_{\gamma_n}$, para $m \leq n$, resulta que $q^* \leq p_m|_{\gamma^*}$, para todo $m \in \omega$.

Ahora observamos que $p_m \in N_0$, luego $\text{sop } p_m \in N_0$ y, como es numerable, de hecho $\text{sop } p_m \subset N_0$. Si $\beta \in \text{sop } p_m \cap [\gamma_0, \gamma[$, entonces es de la forma $\beta = \gamma_0 + \delta$, con $\delta < \alpha$, luego existe un n tal que $\delta < \alpha_n$, luego $\beta < \gamma_n$, luego $\text{sop } p_m \subset \gamma^*$, luego $q \leq p_m$, y en particular $q \leq p_0$ como requiere el enunciado.

Pero además, como $q \leq q_m$ para todo $m \in \omega$ y G_γ es el filtro generado por las condiciones p_m , concluimos que q acota inferiormente a G_γ , luego q es una condición completamente (N_0, \mathbb{P}_γ) -genérica. ■

Ahora ya podemos dar condiciones suficientes para que una iteración con soportes numerables conserve $\mathcal{P}\omega$:

Teorema 10.34 *Sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables tal que, para cada $\delta < \gamma$,*

- a) $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es $\check{\alpha}$ -propio, para todo $\alpha < \omega_1$
- b) $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \bigvee \mathbb{D} \in \check{V}(\mathbb{D} \text{ es un sistema de completitud numerablemente completo} \wedge \pi_\delta \text{ es } \mathbb{D}\text{-completo}).$
- c) $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es separativo, para todo $\delta < \gamma$.

Entonces \mathbb{P}_γ es completamente propio y separativo. En particular conserva $\mathcal{P}\omega$.

DEMOSTRACIÓN: Por 10.25 sabemos que todos los \mathbb{P}_δ son α -propios, para todo $\alpha < \omega_1$. Vamos a probar que todos ellos son completamente propios. Razonando por inducción sobre γ podemos suponer que \mathbb{P}_δ es completamente propio para todo $\delta < \gamma$. Por 8.27 sabemos que \mathbb{P}_γ es separativo.

Para probar que es completamente propio tomamos un cardinal regular κ suficientemente grande, un submodelo elemental numerable $N_0 \prec H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P}_\gamma \in N$ y una condición $p_0 \in \mathbb{P}_\gamma \cap N_0$. Tomamos $\gamma_0 \in \gamma \cap N_0$ y llamamos α al ordinal de $N_0 \cap [\gamma_0, \gamma[$. Claramente podemos construir una torre N de submodelos elementales de $H(\kappa)$ de longitud $\alpha + 1$ cuyo primer término sea el N_0 dado.

Puesto que \mathbb{P}_{γ_0} es α -propio la condición $p_0|_{\gamma_0}$ tiene una extensión $(N, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica, y como es completamente propio ésta tiene a su vez una extensión q_0 que es completamente $(N_0, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica (y seguirá siendo $(N, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica). Por el teorema anterior p_0 tiene una extensión completamente genérica, como había que probar. ■

10.5 C.p.o.s propios sobre isomorfismos

Los c.p.o.s propios conservan \aleph_1 , luego para conservar todos los cardinales basta con que cumplan la condición de cadena \aleph_2 . Sin embargo, ésta no se conserva en general por iteraciones con soportes numerables, así que vamos a introducir una propiedad más fuerte que sí se conserva.

Definición 10.35 Sean $\aleph_2 \leq \mu < \kappa$ cardinales regulares, sea \trianglelefteq un buen orden en $H(\kappa)$ y sean $N_0, N_1 \prec (H(\kappa), \in, \trianglelefteq)$ submodelos elementales numerables (respecto del lenguaje que resulta de añadir al lenguaje de ZFC un relator binario que se interpreta como \trianglelefteq) tales que $\mu \in N_0 \cap N_1$. Diremos que N_0 y N_1 están en *situación normal* respecto a μ si:

- a) Los conjuntos $A = N_0 \cap N_1 \cap \mu$, $B = (N_0 \setminus N_1) \cap \mu$ y $C = (N_1 \setminus N_0) \cap \mu$ cumplen $A < B < C$, en el sentido de que todo elemento de A es menor que todo elemento de B y todo elemento de B es menor que todo elemento de C .
- b) Existe un isomorfismo de modelos $h : N_0 \longrightarrow N_1$ que se restringe a la identidad en $N_0 \cap N_1$ (en particular en A).

En estas condiciones, si $\mathbb{P} \in N_0 \cap N_1$ es un c.p.o., diremos que una condición $q \in \mathbb{P}$ es (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica si:

- a) q es (N_0, \mathbb{P}) -genérica y (N_1, \mathbb{P}) -genérica.⁵
- b) $q \Vdash \bigwedge r \in \check{N}_0 \cap \check{\mathbb{P}} (r \in \Gamma \leftrightarrow h(r) \in \Gamma)$.

En lo que sigue sobrentenderemos que $H(\kappa)$ se considera como modelo del lenguaje que resulta de añadir un relator binario al lenguaje de ZFC que se interpreta como un buen orden \trianglelefteq prefijado, y cuando escribamos $N \prec H(\kappa)$ se entenderá que N es un submodelo elemental respecto de este lenguaje. Observemos que la propiedad b) tiene una interpretación natural:

Teorema 10.36 Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, consideremos $\aleph_2^M \leq \mu < \kappa$ cardinales regulares^M y sean $N_0, N_1 \prec H(\kappa)^M$ en situación normal respecto a μ , con isomorfismo $h : N_0 \longrightarrow N_1$. Sea $\mathbb{P} \in N_0 \cap N_1$ un c.p.o., sea q una condición (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$. Entonces existe $\bar{h} \in M[G]$ tal que $\bar{h} : N_0[G] \longrightarrow N_1[G]$ es un isomorfismo que extiende a h y $\bar{h}(G) = G$.

DEMOSTRACIÓN: Todo $x \in N_0[G]$ es de la forma $x = \sigma_G$, con $\sigma \in N_0^\mathbb{P}$. Supongamos que $\sigma_G = \tau_G$, para otro $\tau \in N_0^\mathbb{P}$. Entonces existe $r \in \mathbb{P}$ tal que $r \Vdash \sigma = \tau$. Podemos tomarlo $r \in N_0$. Por otra parte sabemos que en $M[G]$

⁵Notemos que la condición b) implica que si q es (N_0, \mathbb{P}) -genérica, entonces es automáticamente (N_1, \mathbb{P}) -genérica, pues, relativizando a un modelo transitivo M y tomando un filtro genérico tal que $q \in G$, para todo $D \in N_1$ predenso en \mathbb{P} se cumple que $h^{-1}(D) \in N_0$ es predenso en \mathbb{P} , luego existe $r \in h^{-1}(D) \cap N_0 \cap G$, luego, por b), $h(r) \in D \cap N_1 \cap G$, y esto implica que q es (N_1, \mathbb{P}) -genérica.

se cumple que $\bigwedge r \in N_0 \cap \mathbb{P} (r \in G \leftrightarrow h(r) \in G)$, luego $h(r) \in G$, y claramente $h(r) \Vdash h(\sigma) = h(\tau)$, luego concluimos que $h(\sigma)_G = h(\tau)_G$.

Esto nos permite definir $\bar{h} : N_0[G] \longrightarrow N_1[G]$ mediante $\bar{h}(\sigma_G) = h(\sigma)_G$, y es fácil ver que es un isomorfismo cuyo inverso es \bar{h}^{-1} . Además, como $h(\Gamma) = \Gamma$, es claro que $\bar{h}(G) = G$. También es claro que $\bar{h} \in M[G]$. ■

Ahora ya podemos introducir la propiedad que vamos a estudiar en esta sección:

Definición 10.37 Si $\mu \geq \aleph_2$ es un cardinal regular, diremos que un c.p.o. \mathbb{P} es μ -propio sobre isomorfismos si para todo cardinal regular κ suficientemente grande, cuando $N_0, N_1 \prec H(\kappa)$ son submodelos elementales numerables en situación normal,⁶ $x, \mathbb{P} \in N_0 \cap N_1$ y $p \in N_0 \cap \mathbb{P}$, existe una condición (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p$.

Observemos que todo c.p.o. μ -propio sobre isomorfismos es propio. En efecto, si \mathbb{P} cumple la definición de μ -propio sobre isomorfismos, por el teorema 10.14 (con $\alpha = 1$) basta probar que \mathbb{P} cumple la definición de c.p.o. propio para submodelos elementales $N \prec (H(\kappa), \in, \subseteq)$ tales que $\mu, \mathbb{P} \in N$, pues el conjunto de tales submodelos está en $\mathcal{D}H(\kappa)$, y para ello basta aplicar la definición de c.p.o. μ -propio sobre isomorfismos con $N_0 = N_1 = N$ y h igual a la identidad.

Veamos la relación con las condiciones de cadena:

Teorema 10.38 Sea μ un cardinal regular tal que $\nu^{\aleph_0} < \mu$ para todo $\nu < \mu$. Entonces todo c.p.o. separativo y μ -propio sobre isomorfismos cumple la c.c. μ .

DEMOSTRACIÓN: Sea \mathbb{P} un c.p.o. μ -propio sobre isomorfismos y supongamos que $\{p_\alpha\}_{\alpha < \mu}$ es una anticadena en \mathbb{P} . Fijemos un cardinal regular κ tal que $\mathbb{P} \in H(\kappa)$ y tomemos submodelos elementales numerables $N_\alpha \prec H(\kappa)$ tales que $\mu, p_\alpha \in N_\alpha$.

Observemos que \aleph_1 y μ cumplen las hipótesis del lema de los sistemas Δ (teorema [TC 5.12]), luego la familia $\{N_\alpha \mid \alpha < \mu\}$ contiene un sistema Δ de cardinal μ . Equivalentemente, pasando a una subfamilia, podemos suponer que existe un K tal que⁷ $N_\alpha \cap N_\beta = K$ para todo $\alpha, \beta < \mu$. El mismo argumento aplicado a la familia $\{N_\alpha \cap \mu\}_{\alpha < \mu}$, y pasando nuevamente a una subfamilia si es preciso, podemos suponer que existe un A tal que $N_\alpha \cap N_\beta \cap \mu = A$, para todo $\alpha, \beta < \mu$.

Consideremos ahora un lenguaje formal \mathcal{L} que resulte de añadir al lenguaje de la teoría de conjuntos una constante para cada elemento de K y una constante adicional c , y consideremos a cada N_α como modelo de \mathcal{L} interpretando c como p_α y las demás constantes como los elementos de K correspondientes. Es claro que un conjunto numerable fijo se puede dotar de a lo sumo 2^{\aleph_0} estructuras de modelo de \mathcal{L} , luego existen a lo sumo $2^{\aleph_0} < \mu$ clases de isomorfía

⁶Respecto de cualquier buen orden prefijado en $H(\kappa)$.

⁷Notemos que si el cardinal de $\{N_\alpha \mid \alpha < \mu\}$ fuera menor que μ , podríamos tomar una subfamilia con todos los N_α iguales, que cumpliría trivialmente la misma conclusión.

de modelos numerables de \mathcal{L} . Por lo tanto, restringiendo aún más la familia podemos suponer que todos los modelos N_α son isomorfos como modelos de \mathcal{L} , es decir, que existen isomorfismos de modelos $h_{\alpha\beta} : N_\alpha \rightarrow N_\beta$ que restringidos a K son la identidad y $h_{\alpha\beta}(p_\alpha) = p_\beta$.

Sea $\gamma < \mu$ una cota superior de A . Si el conjunto $\{\alpha < \mu \mid N_\alpha \cap (\gamma \setminus A) \neq \emptyset\}$ tuviera cardinal μ , podríamos encontrar un elemento de $\gamma \setminus A$ que estaría en N_α para μ valores distintos de α , en particular para dos de ellos, en contra de que A es la raíz del sistema Δ . Por lo tanto, restringiendo la familia podemos suponer que todos los elementos de $N_\alpha \setminus A$ son mayores que γ , en particular mayores que todos los elementos de A . En particular, si llamamos $B = N_0 \cap \mu$, tenemos que $A < B$.

Razonando análogamente con una cota de B obtenemos que, para cierto valor de $\alpha > 0$ (y reordenando podemos suponer $\alpha = 1$, se cumple que si llamamos $C = N_1 \cap \mu$, entonces $A < B < C$. Por lo tanto, N_0 y N_1 están en situación normal con un isomorfismo $h = h_{01}$ que además cumple $h(p_0) = p_1$.

Ahora usamos que \mathbb{P} es μ -propio sobre isomorfismos, lo que nos da una condición (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p_0$. Como $q \Vdash \check{p}_0 \in \Gamma$, también $q \Vdash \check{h}(\check{p}_0) \in \Gamma$, luego $q \Vdash \check{p}_1 \in \Gamma$ y, como \mathbb{P} es separativo, resulta que $q \leq p_1$, en contradicción con que $p_0 \perp p_1$. ■

En general, no todo c.p.o. con la c.c. μ es μ -propio sobre isomorfismos, pero si lo son los c.p.o.s que cumplen una propiedad más fuerte:

Teorema 10.39 *Si $\mu \geq \aleph_2$ es un cardinal regular y \mathbb{P} es un c.p.o. propio tal que $|\mathbb{P}| < \mu$, entonces \mathbb{P} es μ -propio sobre isomorfismos.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\kappa > \mu$ un cardinal regular suficientemente grande (para que cumpla con \mathbb{P} la definición de c.p.o. propio) tal que $\mathbb{P} \in H(\kappa)$. Consideramos dos submodelos elementales numerables $N_0, N_1 \preceq H(\kappa)$ en situación normal de modo que $\mathbb{P} \in N_0 \cap N_1$ y una condición $p \in N_0 \cap \mathbb{P}$.

Sea $\xi = |\mathbb{P}| \in N_0 \cap N_1$ y sea $g : \xi \rightarrow \mathbb{P}$ la menor biyección respecto al orden prefijado \trianglelefteq . El hecho de que podamos determinar g mediante \trianglelefteq se traduce en que $g \in N_0 \cap N_1$. Como $\xi \in N_0 \cap N_1 \cap \mu$ tenemos que $N_0 \cap \xi = N_1 \cap \xi$. Por lo tanto, aplicando g , resulta que $N_0 \cap \mathbb{P} = N_1 \cap \mathbb{P} \subset N_0 \cap N_1$ y el isomorfismo h es la identidad en $N_0 \cap \mathbb{P}$. Por lo tanto, si $q \leq p$ es cualquier condición (N_0, \mathbb{P}) -genérica, sucede que es también (N_1, \mathbb{P}) -genérica, pues cumple trivialmente la condición b), luego también es (N_1, \mathbb{P}) -genérica. ■

La prueba del teorema anterior ilustra el interés de considerar un buen orden en $H(\kappa)$: nos permite asegurar que una elección arbitraria a partir de parámetros que están en los dos modelos N_0 y N_1 puede tomarse de modo que esté también en los dos modelos.

El teorema 10.38 implica en particular que todo c.p.o. \aleph_2 -propio sobre isomorfismos cumple la c.c. \aleph_2 . Veamos que podemos afirmar un poco más:

Teorema 10.40 *Si $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ y \mathbb{P} es un c.p.o. \aleph_2 -propio sobre isomorfismos, entonces $\mathbb{1} \Vdash 2^{\aleph_0} = \aleph_1$.*

DEMOSTRACIÓN: Relativizamos la prueba a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Si el resultado es falso, existen un $p \in \mathbb{P}$ y un $\sigma \in M^\mathbb{P}$ tales que $p \Vdash \sigma : \omega_2 \longrightarrow \mathcal{P}\omega$ inyectiva. Sea $\kappa > \aleph_2$ suficientemente grande tal que $\mathbb{P} \in H(\kappa)$. Para cada $\alpha < \omega_2$ sea $N_\alpha \prec H(\kappa)$ numerable tal que $\alpha, \mathbb{P}, \sigma \in N_\alpha$.

Como \aleph_1 y \aleph_2 cumplen las hipótesis del lema de los sistemas Δ (teorema [TC 5.12]), existe $I \subset \omega_2$ de cardinal \aleph_2 tal que la subfamilia $\{N_\alpha\}_{\alpha \in I}$ es un sistema Δ de raíz K . Razonando igualmente con $\{N_\alpha \cap \omega_2\}_{\alpha \in I}$ y restringiendo I si es preciso, podemos suponer que esta familia también es un sistema Δ , de raíz A .

Consideramos a cada N_α como modelo del lenguaje formal que resulta de añadirle al lenguaje de ZFC un relator diádico que se interpreta como el buen orden que presuponemos en $H(\kappa)$, una constante que se interpreta como α y un conjunto numerable de constantes que se interpretan como los elementos de K . Como a lo sumo hay $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ clases de isomorfía de modelos numerables de dicho lenguaje (basta considerar modelos con universo ω), restringiendo aún más el conjunto I podemos suponer que todos los modelos $\{N_\alpha\}_{\alpha \in I}$ son isomorfos, con isomorfismos $h_{\alpha\beta} : N_\alpha \longrightarrow N_\beta$ que se restringen a la identidad en la intersección $K = N_\alpha \cap N_\beta$ y que cumplen que $h_{\alpha\beta}(\alpha) = \beta$.

El mismo argumento empleado en la prueba del 10.38 nos permite seleccionar $\alpha < \beta < \omega_2$ de modo que $h_{\alpha\beta} : N_\alpha \longrightarrow N_\beta$ cumpla todos los requisitos de la definición de situación normal. Por simplificar, pasamos a llamar N_0 y N_1 a estos dos modelos, de modo que están en situación normal respecto de ω_2 y el isomorfismo $h : N_0 \longrightarrow N_1$ cumple $h(\alpha) = \beta > \alpha$.

Por hipótesis podemos tomar una condición (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$. Entonces, en $M[G]$ podemos considerar $f = \sigma_G \in N_0[G] \cap N_1[G]$, de modo que $f : \omega_2 \longrightarrow \mathcal{P}\omega$ inyectiva, pero también tenemos que h se extiende a un isomorfismo $h : N_0[G] \longrightarrow N_1[G]$ que deja invariante a G , por lo que $h(f) = h(\sigma_G) = h(\sigma)_G = \sigma_G = f$.

Observemos que h es la identidad en $N_0[G] \cap \mathcal{P}\omega$, pues si $a \in N_0[G] \cap \mathcal{P}\omega$ y $n \in a$, entonces $n = h(n) \in h(a)$, mientras que si $n \in \omega \setminus a$, entonces $n = h(n) \notin h(a)$, luego $a = h(a)$. Por consiguiente, $f(\alpha) = h(f(\alpha)) = h(f)(h(\alpha)) = f(\beta)$, en contradicción con la inyectividad de f . ■

Veamos ahora que la propiedad de ser μ -propio sobre isomorfismos, a diferencia de las condiciones de cadena, se conserva por iteraciones con soportes numerables. Empezamos generalizando el teorema 10.16:

Teorema 10.41 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. y π un nombre para un c.p.o. Sea $\mathbb{R} = \mathbb{P} * \pi$, sean $\aleph_2 \leq \mu < \kappa$ cardinales regulares, sean $N_0, N_1 \prec H(\kappa)$ en situación normal respecto a μ de modo que $\mathbb{R} \in N_0 \cap N_1$. Entonces una condición $(p, \sigma) \in \mathbb{R}$ es (N_0, N_1, \mathbb{R}) -genérica si y sólo si:*

- a) p es (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica y
- b) $p \Vdash \sigma$ es $(\check{N}_0[\Gamma], \check{N}_1[\Gamma], \pi)$ -genérica.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Llamemos $h : N_0 \rightarrow N_1$ al isomorfismo que prueba que N_0 y N_1 están en situación normal. Observemos que si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$, entonces el teorema 10.36 nos da un isomorfismo $\bar{h} : N_0[G] \rightarrow N_1[G]$ que extiende a h y tal que $\bar{h}(G) = G$. Además por 10.3 tenemos que $N_0[G], N_1[G] \prec H(\kappa)^{M[G]}$. Si p es (N_0, \mathbb{P}) -genérica y (N_1, \mathbb{P}) , genérica, entonces el filtro G es (N_0, \mathbb{P}) -genérico y (N_1, G) -genérico, luego las extensiones $N_0[G]$ y $N_1[G]$ se colapsan a extensiones genéricas de los colapsos de N_0 y N_1 , respectivamente. Usando que las extensiones genéricas no añaden ordinales concluimos inmediatamente que $N_0[G]$ y $N_1[G]$ están en situación normal respecto de μ , lo cual da sentido a la propiedad b) supuesto que se cumple a).

Supongamos ahora que se cumplen a) y b). Por 10.16 tenemos que (p, σ) es (N_0, \mathbb{R}) -genérica y (N_1, \mathbb{R}) -genérica. Ahora tomamos un filtro \mathbb{R} -genérico sobre M que contenga a (p, σ) , que será de la forma $G * H$, donde G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$ y H es un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G]$, donde $\mathbb{Q} = \pi_G$, tal que $\sigma_G \in H$. Por b) tenemos que la condición σ_G es $(N_0[G], N_1[G], \mathbb{Q})$ -genérica y por

Ahora tomamos $(r, \tau) \in \mathbb{R} \cap N_0$. Si $(r, \tau) \in G * H$ entonces $r \in G$, luego por a) tenemos que $h(r) \in G$. Por otra parte $\tau_G \in H$, luego por b) tenemos que $h(\tau_G) = h(\tau)_G \in H$, luego $h(r, \tau) \in G * H$, e igualmente se prueba la inclusión opuesta, luego (p, σ) es (N_0, N_1, \mathbb{R}) -genérica.

Supongamos ahora que (p, σ) es (N_0, N_1, \mathbb{R}) -genérica. Entonces, por 10.16 tenemos que p es (N_0, \mathbb{P}) -genérica y (N_1, \mathbb{P}) -genérica y que

$$p \Vdash \sigma \text{ es } (\check{N}_0[\Gamma], \pi)\text{-genérica y } (\check{N}_1[\Gamma], \pi)\text{-genérica.}$$

Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$ y sea $r \in N_0 \cap \mathbb{P} \cap G$. Sea $\mathbb{Q} = \pi_G$ y sea H un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G]$ tal que $\sigma_G \in H$. Entonces tenemos que $(r, \mathbf{1}_\pi) \in N_0 \cap \mathbb{R} \cap (G * H)$, luego por la hipótesis sobre (p, σ) , que está en $G * H$, resulta que $(h(r), \mathbf{1}_\pi) \in G * H$, luego $h(r) \in G$, e igualmente se prueba la implicación contraria, de modo que se cumple a).

Para probar b) tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $p \in G$, con lo que sabemos que σ_G es $(N_0[G], \mathbb{Q})$ -genérica y $(N_1[G], \mathbb{Q})$ -genérica, donde $\mathbb{Q} = \pi_G$. Consideramos la extensión $\bar{h} : N_0[G] \rightarrow N_1[G]$, con la que ambos modelos están en situación normal respecto de μ . Ahora fijamos un filtro \mathbb{Q} -genérico sobre $M[G]$ tal que $\sigma_G \in H$, y tomamos $\tau_G \in N_0[G] \cap \mathbb{Q} \cap H$. No perdemos generalidad si suponemos que $\tau \in \hat{\pi} \cap N_0$, de modo que $(\mathbf{1}, \tau) \in N_0 \cap \mathbb{R} \cap (G * H)$, luego por hipótesis, como $(p, \sigma) \in G * H$, resulta que $h(\mathbf{1}, \tau) \in G * H$, luego $\bar{h}(\tau_G) = h(\tau)_G \in H$. Igualmente se prueba la implicación contraria, luego se cumple b). ■

La prueba del teorema siguiente es idéntica a la de 10.17 usando el teorema anterior en lugar de 10.16:

Teorema 10.42 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. μ -propio sobre isomorfismos para cierto cardinal μ y sea π un nombre para un c.p.o. tal que $\mathbb{1} \Vdash \pi$ es $\check{\mu}$ -propio sobre isomorfismos. Sea $\mathbb{R} = \mathbb{P} * \pi$, sea $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{P}$ la proyección dada por $\phi(p, \sigma) = p$ y sea $i : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{R}$ la inmersión completa dada por $i(p) = (p, \mathbb{1})$. Sea $\kappa > \mu$ un cardinal regular suficientemente grande y sean $N_0, N_1 \prec H(\kappa)$ submodelos elementales numerables en situación normal respecto de μ de modo que $\mathbb{R} \in N_0 \cap N_1$. Supongamos que $p \in \mathbb{P}$ es (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica y sea $\sigma \in V^{\mathbb{P}}$ tal que*

$$p \Vdash \sigma \in \check{N}_0 \cap \check{\mathbb{R}} \wedge \phi(\sigma) \in \Gamma.$$

Entonces existe $\tau \in \hat{\pi}$ tal que (p, τ) es (N_0, N_1, \mathbb{R}) -genérico y $(p, \tau) \Vdash i(\sigma) \in \Gamma$.

Igualmente, la prueba de 10.18 se adapta trivialmente para probar:

Teorema 10.43 *Sea \mathbb{P} un c.p.o. separativo μ -propio sobre isomorfismos y sea π un nombre para un c.p.o. tal que $\mathbb{1} \Vdash \pi$ es separativo y $\check{\mu}$ -propio para isomorfismos. Entonces $\mathbb{P} * \pi$ es separativo y $\check{\mu}$ -propio para isomorfismos.*

Pasamos ahora al resultado análogo a 10.20:

Teorema 10.44 *Sea $\mu \geq \aleph_2$ un cardinal regular y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables de longitud $\gamma < \mu$ de modo que, para cada $\delta < \gamma$, \mathbb{P}_δ sea separativo y μ -propio sobre isomorfismos⁸ y $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es separativo y $\check{\mu}$ -propio sobre isomorfismos, sea κ un cardinal suficientemente grande y $N_0, N_1 \prec H(\kappa)$ numerables en situación normal respecto de μ y tales que $\gamma, \mathbb{P}_\gamma \in N_0 \cap N_1$. Sea $\gamma_0 \in \gamma \cap N_0$ y $q_0 \in \mathbb{P}_{\gamma_0}$ una condición $(N_0, N_1, \mathbb{P}_{\gamma_0})$ -genérica. Entonces, si $\sigma_0 \in V^{\mathbb{P}_{\gamma_0}}$ cumple que*

$$q_0 \Vdash \sigma_0 \in \check{\mathbb{P}}_\gamma \cap \check{N}_0 \wedge \sigma_0|_{\check{\gamma}_0} \in \Gamma,$$

existe una condición $(N_0, N_1, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica q tal que $q|_{\gamma_0} = q_0$ y $q \Vdash i_{\gamma_0 \gamma}(\sigma_0) \in \Gamma$.

DEMOSTRACIÓN: Por brevedad vamos a indicar únicamente las variantes no triviales respecto de la demostración de 10.20. Como pauta general, basta sustituir N por N_0 y “ (N, \mathbb{P}) -genérica” por “ (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica”.

Razonamos igualmente por inducción sobre γ . El caso $\gamma = 0$ es trivial y el caso $\gamma = \delta + 1$ se adapta trivialmente (notemos que se cumple que $\delta \in N_0 \cap N_1$, y esto permite aplicar la hipótesis de inducción). En el caso $\delta = \gamma_0$ usamos 10.42.

En el caso en que γ es un ordinal límite empezamos observando que, por la definición de situación normal, se cumple

$$\gamma \cap N_0 = \gamma \cap N_1 = \gamma \cap N_0 \cap N_1,$$

pues $\gamma \in \mu \cap N_0 \cap N_1$ es menor que cualquier ordinal de $\mu \cap (N_0 \setminus N_1)$ o de $\mu \cap (N_1 \setminus N_0)$. Esta observación nos permite tomar la sucesión $\{\gamma_n\}_{n \in \omega}$ tal que

⁸Una vez probado el teorema 10.45 la hipótesis de que \mathbb{P}_δ sea separativo y μ -propio sobre isomorfismos puede eliminarse.

$\gamma_n \in \gamma \cap N_0 \cap N_1$. Esto es necesario para poder aplicar la hipótesis de inducción a los γ_n .

Tomamos igualmente una enumeración $\{D_n\}_{n \in \omega}$ de los subconjuntos densos de \mathbb{P}_γ pertenecientes a N_0 y construimos las sucesiones $\{q_n\}_{n \in \omega}$ y $\{\sigma_n\}_{n \in \omega}$ en las mismas condiciones (con N_0 en lugar de N).

El mismo argumento prueba que la condición q es (N_0, \mathbb{P}_γ) -genérica. Para probar que es $(N_0, N_1, \mathbb{P}_\gamma)$ -genérica basta probar la condición b) de la definición (y eso ya implica que q es (N_1, \mathbb{P}_γ) -genérica). Para ello (trabajando en un modelo numerable M) tenemos que probar que

$$q \Vdash \bigwedge r \in \check{N}_0 \cap \check{\mathbb{P}}_\gamma (r \in \Gamma \leftrightarrow \check{h}(r) \in \Gamma).$$

Probamos la implicación \rightarrow , pues la otra es análoga. En caso contrario existe un filtro genérico tal que $q \in G$, pero existe $r \in N_0 \cap \mathbb{P}_\gamma \cap G$ tal que $h(r) \notin G$. Sea $q' \leq q$ tal que $q' \Vdash \check{r} \in \Gamma \wedge \check{h}(\check{r}) \notin \Gamma$ y cambiemos G por otro filtro que cumpla $q' \in G$.

Entonces $r \in N_0 \cap \mathbb{P}_\gamma \cap G$, luego $r|_{\gamma_n} \in N_0 \cap \mathbb{P}_{\gamma_n} \cap G_{\gamma_n}$ y, puesto que $q_n \in G_{\gamma_n}$ es $(N_0, N_1, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica, se cumple que $h(r)|_{\gamma_n} \in G_{\gamma_n}$. Si llamamos $r_n^* = i_{\gamma_n \gamma}(h(r)|_{\gamma_n})$, tenemos que $r_n^* \in G$, luego $q' \Vdash \check{r}_n^* \in \Gamma$, luego $q' \leq r_n^*$, y esto implica que $q' \leq i_{\bar{\gamma} \gamma}(h(r)|_{\bar{\gamma}})$. Ahora bien, como $h(r) \in N_1$, tenemos que $\text{sop } h(r) \subset N_1 \cap \gamma \subset \bar{\gamma}$, luego $i_{\bar{\gamma} \gamma}(h(r)|_{\bar{\gamma}}) = h(r)$ y resulta que $q' \leq h(r)$, luego $h(r) \in G$, contradicción.

El resto de las comprobaciones y la construcción de las dos sucesiones requeridas resultan de adaptar trivialmente los argumentos de 10.20. ■

Ahora la primera parte de la prueba de 10.21 se adapta trivialmente para concluir:

Teorema 10.45 *Sea $\mu \geq \aleph_2$ un cardinal regular y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables de longitud $\gamma < \mu$ de modo que, para cada $\delta < \gamma$, se cumple que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es separativo y $\check{\mu}$ -propio sobre isomorfismos, entonces cada \mathbb{P}_δ es separativo y μ -propio sobre isomorfismos.*

Por último, para concluir que \mathbb{P}_γ cumple la c.c. μ no es necesario exigir $\gamma < \mu$:

Teorema 10.46 *Sea $\mu \geq \aleph_2$ un cardinal regular tal que $\nu^{\aleph_0} < \mu$ para cada $\nu < \mu$ y $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes con soportes numerables tal que, para cada $\delta < \gamma$, se cumple que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es separativo y $\check{\mu}$ -propio sobre isomorfismos, entonces \mathbb{P}_γ cumple la c.c. μ .*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\{p_\epsilon\}_{\epsilon < \mu}$ una familia de condiciones de \mathbb{P}_γ . El conjunto $E = \{\lambda < \mu \mid \text{cf } \lambda > \aleph_0\}$ es estacionario en μ y la función $f : E \rightarrow \mu$ dada por $f(\lambda) = \sup(\lambda \cap \text{sop } p_\lambda)$ cumple $f(\lambda) < \lambda$.

Por el teorema de Fodor [TC 6.15] existe $E_0 \subset E$ estacionario en μ tal que $f|_{E_0}$ toma un valor constante $\gamma_0 < \mu$. Restringiendo la familia dada, podemos suponer que $\text{sop } p_\epsilon \subset \gamma_0$, para todo $\epsilon < \mu$.

Si $\{\text{sop } p_\epsilon \mid \epsilon < \mu\}$ tiene cardinal $< \mu$, entonces restringiendo aún más la familia podemos suponer que todos los soportes son iguales, y en caso contrario

podemos aplicar el lema de los sistemas Δ (teorema [TC 5.12]) y exigir que la familia de soportes sea cuasidisjunta de raíz $r \subset \gamma_0$ (cosa que también sucede en el primer caso). Por el teorema anterior \mathbb{P}_{γ_0} es separativo y μ -propio sobre isomorfismos, y por 10.38 cumple la c.c. μ , luego existen $\epsilon < \epsilon' < \mu$ tales que $\neg p_\epsilon|_{\gamma_0} \perp p_{\epsilon'}|_{\gamma_0}$ y por 8.22 f) esto implica que $\neg p_\epsilon \perp p_{\epsilon'}$. ■

10.6 Acotación de ${}^\omega\omega$.

Estudiamos ahora una propiedad más débil que la conservación de $\mathcal{P}\omega$.

Definición 10.47 Si $f, g \in {}^\omega\omega$, diremos que g *acota* a f , y lo representaremos por $f \leq g$, si $\bigwedge n \in \omega f(n) \leq g(n)$ (y análogamente $f < g$ significará que $\bigwedge n \in \omega f(n) < g(n)$). Similarmente, diremos que g *acota finalmente* a f , y lo representaremos por $f \leq^* g$, si $\bigvee k \in \omega \bigwedge n \geq k f(n) \leq g(n)$ (y análogamente se define $f <^* g$).

Una observación elemental es que si $F \subset {}^\omega\omega$ es numerable, entonces existe $g \in {}^\omega\omega$ que acota finalmente a todos los elementos de F . En efecto, basta enumerar $F = \{f_n \mid n \in \omega\}$ y definir $g(n) = \max_{k \leq n} f_k(n)$.

Diremos que un c.p.o. \mathbb{P} *acota* a ${}^\omega\omega$ si

$$\mathbb{1} \Vdash \bigwedge f \in {}^\omega\omega \bigvee g \in {}^\omega\omega \cap \check{V} f <^* g.$$

Equivalentemente, si \mathbb{P} está en un modelo transitivo numerable M de ZFC y G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M , se cumple que \mathbb{P} acota a ${}^\omega\omega$ si y sólo si toda $f \in ({}^\omega\omega)^{M[G]}$ está acotada por una $g \in ({}^\omega\omega)^M$. Notemos que en la definición es equivalente exigir $f <^* g$, $f \leq^* g$, $f < g$ o $f \leq g$.

Como en otros casos, el resultado principal que queremos obtener es que la propiedad de ser un c.p.o. propio que acota ${}^\omega\omega$ se conserva por iteraciones con soportes numerables. Necesitamos algunos conceptos auxiliares:

Si \mathbb{P} es un c.p.o. y $\phi \in V^\mathbb{P}$ cumple que $\mathbb{1} \Vdash \phi \in {}^\omega\omega$, diremos que una sucesión decreciente $\{p_n\}_{n \in \omega}$ de condiciones *interpreta* ϕ como una función $f \in {}^\omega\omega$ si $\bigwedge n \in \omega p_n \Vdash \phi|_{\check{n}} = \check{f}|_{\check{n}}$.

Notemos que ϕ tiene a lo sumo una interpretación respecto de una sucesión $\{p_n\}_{n \in \omega}$, pues si f y g son dos interpretaciones distintas de ϕ , existirá un $n \in \omega$ tal que $f(n) \neq g(n)$, pero $p_{n+1} \Vdash \check{f}(\check{n}) = \check{g}(\check{n})$, lo cual es imposible. Por lo tanto podemos escribir $f = \text{int}(\{p_n\}_{n \in \omega}, \phi)$.

Si una sucesión $\{p_n\}_{n \in \omega}$ interpreta un nombre ϕ , diremos que *respeta* una función $g \in {}^\omega\omega$ si $\text{int}(\{p_n\}_{n \in \omega}, \phi) < g$.

Teorema 10.48 Sea \mathbb{P} un c.p.o. que acote ${}^\omega\omega$, sea $\phi \in V^\mathbb{P}$ tal que $\mathbb{1} \Vdash \phi \in {}^\omega\omega$, sea κ un cardinal regular, sea $N \prec H(\kappa)$ numerable tal que $\mathbb{P}, \phi \in N$ y supongamos que $g \in {}^\omega\omega$ acota finalmente a ${}^\omega\omega \cap N$ y que $\{p_n\}_{n \in \omega} \in N$ es una sucesión decreciente de condiciones que interpreta ϕ y respeta g . Entonces existen $p \in \mathbb{P} \cap N$ y $h \in N$, $h < g$ tales que $p \Vdash \phi \leq \check{h}$, con lo que $p \Vdash \phi < \check{g}$.

DEMOSTRACIÓN: Trabajamos en N . Sea $f = \text{int}(\{p_n\}_{n \in \omega}, \phi)$. Notemos que $f \in N$ y estamos suponiendo que $f < g$. Para cada $n \in \omega$, elegimos $p'_n \in \mathbb{P} \cap N$, $p'_n \leq p_n$ tal que

- a) Existe $h_n \in {}^\omega\omega \cap N$ tal que $p'_n \Vdash \phi \leq \check{h}_n$,
- b) $h_n|_n = f|_n$.

Notemos que a) es posible porque \mathbb{P} acota a ${}^\omega\omega$ y b) es posible porque $p_n \Vdash \phi|_{\check{n}} = \check{f}|_{\check{n}}$. La elección puede realizarse en N , de modo que se cumple $\{p'_n\}_{n \in \omega}, \{h_n\}_{n \in \omega} \in N$. Ahora definimos $u \in {}^\omega\omega$ mediante $u(n) = \max_{i \leq n} h_i(n)$.

Caramente $u \in N$, luego $u <^* g$, digamos que $\bigwedge n \geq l u(n) < g(n)$. De aquí podemos deducir que $h_l < g$. En efecto, si $i < l$, entonces $h_l(i) = f(i) < g(i)$, mientras que si $i \geq l$ entonces $h_l(i) \leq u(i) < g(i)$.

Finalmente observamos que $p = p'_l$ y $h = h_l$ cumplen lo requerido. ■

A partir de aquí consideramos una iteración $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ en un modelo transitivo numerable M de ZFC, fijamos ordinales $\alpha \leq \beta < \gamma$ y llamamos G_α a un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M . En $M[G_\alpha]$ consideramos los c.p.o.s $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ y $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$, donde, según vimos al final de la sección 8.2,

$$\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha = \{p \in \mathbb{P}_\gamma \mid p|_\alpha \in G_\alpha\}.$$

Consideremos $\phi \in M^{\mathbb{P}_\gamma}$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \phi \in {}^\omega\omega$. A partir de él podemos formar el nombre $\bar{\phi}$ que se corresponde con ϕ a través de la inmersión densa $i : \mathbb{P}_\gamma \longrightarrow \mathbb{P}_\alpha * (\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha)$ dada por 8.28, y a su vez el \mathbb{P}_α -nombre $\phi_{\Gamma_\alpha}^\gamma = \bar{\phi}^*$ dado por 8.11. Llamaremos $\phi_{G_\alpha}^\gamma = (\phi_{\Gamma_\alpha}^\gamma)_{G_\alpha} \in M^{\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha}$. De este modo, si G_γ es cualquier filtro $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ (luego \mathbb{P}_γ -genérico sobre M), entonces $(\phi_{G_\alpha}^\gamma)_{G_\gamma} = \phi_{G_\gamma}$. En particular, $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha} \Vdash \phi_{G_\alpha}^\gamma \in {}^\omega\omega$.

Sea G_β un filtro $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ (con lo que $i_{\alpha\beta}^{-1}[G_\beta] = G_\alpha$) y sea $r = \{r_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\alpha]$ una sucesión decreciente en $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ que interpreta a $\phi_{G_\alpha}^\gamma$. Vamos a definir recurrentemente una sucesión decreciente $s(r) = \{s_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\beta]$ de condiciones de $\mathbb{P}_\gamma/G_\beta$ que interpreta a $\phi_{G_\beta}^\gamma$. Concretamente:

- a) Si $r_n|_\beta \in G_\beta$ tomamos $s_n = r_n$,
- b) Si $r_n|_\beta \notin G_\beta$ entonces definimos s_n como una extensión de s_{n-1} en $\mathbb{P}_\gamma/G_\beta$ que determine el valor de $\phi_{G_\beta}^\gamma|_{\check{n}}$.

La condición b) significa que existe un $t_n \in {}^n\omega$ tal que $s_n \Vdash \phi_{G_\beta}^\gamma|_{\check{n}} = \check{t}_n$. Notemos que si se da la condición a) para un n , se da también para todos los anteriores. En particular, si todos los $r_n|_\beta \in G_\beta$, entonces $\{s_n\}_{n \in \omega} = \{r_n\}_{n \in \omega}$.

Como la construcción se hace en $M[G_\beta]$, tenemos que $\{t_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\beta]$ y como $s_{n+1} \leq s_n$, $s_{n+1} \Vdash \check{t}_{n+1}|_{\check{n}} = \check{t}_n$, luego $t_{n+1}|_n = t_n$, luego podemos definir $f = \bigcup_{n \in \omega} t_n \in ({}^\omega\omega)^{M[G_\beta]}$ de modo que $\{s_n\}_{n \in \omega}$ interpreta $\phi_{G_\beta}^\gamma$ como f .

Las elecciones que requiere el apartado b) pueden hacerse respecto de un buen orden prefijado R de \mathbb{P}_γ en M , con lo que podemos definir un nombre $\delta_\beta(r, \phi) \in M[G_\alpha]^{\mathbb{P}_\beta/G_\alpha}$ de modo que $\mathbf{1}_{\mathbb{P}_\beta/G_\alpha}$ fuerce que $\delta_\beta(r, \phi)$ es la sucesión definida a partir de r, ϕ, Γ y \check{R} .

Teorema 10.49 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y en M sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración de preórdenes. Sean $\alpha \leq \beta < \gamma$ tales que \mathbb{P}_β acote a ${}^\omega\omega$, sea G_α un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M y sea $\phi \in M^{\mathbb{P}_\gamma}$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \phi \in {}^\omega\omega$. Supongamos que en $M[G_\alpha]$ se cumple:*

- a) $p \in \mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ y $\{r_n\}_{n \in \omega}$ es una sucesión decreciente de condiciones bajo p de $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ que interpreta a $\phi_{G_\alpha}^\gamma$.
- b) κ es un cardinal regular y $N \prec H(\kappa)$ es un modelo numerable que cumple $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha, \beta, \phi, \{r_n\}_{n \in \omega}, p \in N$.
- c) $g \in {}^\omega\omega$ acota finalmente a ${}^\omega\omega \cap N$ y $\{r_n\}_{n \in \omega}$ respeta a g .

Entonces existe $s \in N \cap (\mathbb{P}_\beta/G_\alpha)$, $s \leq p|_\beta$ tal que $s \Vdash \delta_\beta(r, \phi)$ respeta a \check{g} y extiende a \check{p} .

DEMOSTRACIÓN: Llamemos $\delta = \delta_\beta(r, \phi) \in M^{\mathbb{P}_\beta/G_\alpha}$. Tomemos un nombre $\psi \in M^{\mathbb{P}_\beta/G_\alpha}$ tal que⁹ $\mathbf{1} \Vdash \psi = \text{int}(\delta, (\phi_{\Gamma_\beta}^\gamma)_{G_\alpha}^\beta)$. En particular $\mathbf{1} \Vdash \psi \in {}^\omega\omega$.

Sea $p_n = r_n|_\beta \in \mathbb{P}_\beta/G_\alpha$. Vamos a ver que podemos aplicar el teorema anterior en $M[G_\alpha]$ a $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ con la sucesión $\{p_n\}_{n \in \omega} \in N$, el nombre ψ y la función g .

Observemos en primer lugar que $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ acota a ${}^\omega\omega$, pues si G_β es un filtro $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$, entonces también es \mathbb{P}_β -genérico sobre M , y $M[G_\alpha][G_\beta] = M[G_\beta]$, luego todo $f \in {}^\omega\omega \cap M[G_\alpha][G_\beta]$ está acotado por un $g \in {}^\omega\omega \cap M \subset {}^\omega\omega \cap M[G_\alpha]$.

Veamos ahora que $\{p_n\}_{n \in \omega}$ interpreta ψ . Concretamente, vamos a ver que lo interpreta como $f = \text{int}(r, \phi_{G_\alpha}^\gamma) \in M[G_\alpha]$. Para ello fijamos un filtro $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$ tal que $p_n \in G_\beta$ y llamamos $h = \psi_{G_\beta}$.

En $M[G_\beta]$ tenemos que $r_n|_\beta = p_n \in G_\beta$, luego $r_n \in \mathbb{P}_\gamma/G_\beta$ y, por definición, $(\delta_{G_\beta})_n = r_n$. Por tanto en $M[G_\beta]$ se cumple que $r_n \Vdash \phi_{G_\beta}^\gamma|_{\check{n}} = \check{h}|_{\check{n}}$.

Por otra parte, si G_γ es un filtro $\mathbb{P}_\gamma/G_\beta$ -genérico sobre $M[G_\beta]$ que cumpla $r_n \in G_\gamma$, sabemos que también es \mathbb{P}_γ -genérico sobre M y $\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$, así como que $M[G_\beta][G_\gamma] = M[G_\beta] = M[G_\alpha][G_\gamma]$. Por definición de f tenemos que $(\phi_{G_\beta}^\gamma)_{G_\gamma}|_n = \phi_{G_\gamma}|_n = (\phi_{G_\alpha}^\gamma)_{G_\gamma}|_n = f|_n$, luego concluimos que en $M[G_\beta]$ se cumple que $r_n \Vdash \phi_{G_\beta}^\gamma|_{\check{n}} = \check{f}|_{\check{n}}$. Esto implica que $h|_n = f|_n$.

⁹Notemos que $\phi \in M^{\mathbb{P}_\gamma}$, luego $\phi_{\Gamma_\beta}^\gamma \in M^{\mathbb{P}_\beta}$, luego $(\phi_{\Gamma_\beta}^\gamma)_{G_\alpha}^\beta \in M[G_\alpha]^{\mathbb{P}_\beta/G_\alpha}$ y tiene la propiedad de que si G_β es $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$, entonces

$$((\phi_{\Gamma_\beta}^\gamma)_{G_\alpha}^\beta)_{G_\beta} = (\phi_{\Gamma_\beta}^\gamma)_{G_\beta} = \phi_{G_\beta}^\gamma \in M[G_\beta]^{\mathbb{P}_\gamma/G_\beta},$$

que es el nombre al que interpreta δ_{G_β} .

Por consiguiente, en $M[G_\alpha]$ se cumple que $p_n \Vdash \psi|_{\check{n}} = \check{f}|_{\check{n}}$, como había que probar.

La hipótesis de que $\{r_n\}_{n \in \omega}$ respeta a g significa que $f < g$, luego $\{p_n\}_{n \in \omega}$, que interpreta a ψ como f , también respeta a g . Con esto tenemos comprobadas todas las hipótesis del teorema anterior, que nos da que existe una condición $s \in (\mathbb{P}_\beta/G_\alpha) \cap N$ tal que $s \Vdash \psi < \check{g}$, pero esto significa que $s \Vdash \delta_\beta(r, \phi)$ respeta a \check{g} .

Más aún, en la prueba del teorema anterior se ve¹⁰ que $s \leq p_0 = r_0|_\beta \leq p|_\beta$, luego $s \Vdash \delta_0 = \check{r}_0 \leq \check{p}$, luego s fuerza que toda la sucesión $\delta_\beta(r, \phi)$ extiende a p . ■

Teorema 10.50 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC y en M sea $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración con soportes numerables de preórdenes propios y separativos. Sean $\alpha < \beta < \gamma$ tales que \mathbb{P}_α y \mathbb{P}_β acoten a $\omega\omega$. Supongamos que en M se cumple:*

- a) $\phi \in M^{\mathbb{P}_\gamma}$ cumple $\mathbb{1} \Vdash \phi \in \omega\omega$.
- b) κ es un cardinal regular y $N \prec H(\kappa)$ cumple $\alpha, \beta, \gamma, \mathbb{P}_\gamma, \phi \in N$.
- c) $q_0 \in \mathbb{P}_\alpha$ es una condición (N, \mathbb{P}_α) -genérica.
- d) $g \in \omega\omega$ acota finalmente a $\omega\omega \cap N$.
- e) $\pi \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ cumple que $q_0 \Vdash \pi \in \check{N} \cap (\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha)$.
- f) q_0 fuerza que en $\check{N}[\Gamma]$ existe una sucesión decreciente de condiciones de $\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\alpha$ bajo π que interpreta a $\phi_{\Gamma_\alpha}^\gamma$ y respeta a \check{g} .

Entonces existe una condición (N, \mathbb{P}_β) -genérica q_1 tal que:

- a) $q_1|_\alpha = q_0$.
- b) $q_1 \Vdash i_{\alpha\beta}(\pi) \in \mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\beta$.
- c) q_1 fuerza que en $\check{N}[\Gamma]$ existe una sucesión decreciente de condiciones de $\mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\beta$ bajo $i_{\alpha\beta}(\pi)$ que interpreta a $\phi_{\Gamma_\beta}^\gamma$ y respeta a \check{g} .

DEMOSTRACIÓN: Sea G_α un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M tal que $q_0 \in G_\alpha$. Por la hipótesis c) tenemos que G_α es un filtro (N, \mathbb{P}_α) -genérico, luego podemos considerar $N[G_\alpha] \prec H(\kappa)^{M[G_\alpha]}$ (podemos suponer κ suficientemente grande para que siga siendo un cardinal regular en $M[G_\alpha]$). Vamos a comprobar que podemos aplicar el teorema anterior al modelo $N[G_\alpha]$. Ciertamente cumple las hipótesis a) y b) tomando como $r = \{r_n\}_{n \in \omega}$ la sucesión dada por la hipótesis f) del enunciado. Además llamamos $p = \pi_{G_\alpha} \in N \cap (\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha)$, que está por encima de todos los r_n .

¹⁰Con la notación de la prueba es $p'_l \leq p_l \leq p_0$.

Como \mathbb{P}_α acota a ${}^\omega\omega$ (y esto se cumple también en N), todo elemento de ${}^\omega\omega \cap N[G_\alpha]$ está finalmente acotado por un elemento de ${}^\omega\omega \cap N$ y, en particular, por g . (Aquí hay que tener en cuenta que el colapso transitivo de $N[G_\alpha]$ es una extensión genérica del colapso transitivo de N .) Esto completa la comprobación de que se cumplen las hipótesis del teorema anterior.

Concluimos que existe una condición $s \in N[G_\alpha] \cap (\mathbb{P}_\beta/G_\alpha)$ tal que $s \leq p|_\beta$ y s fuerza que la sucesión $\delta_\beta(r, \phi)$ respeta a \check{g} y extiende a $\check{\pi}$.

Observemos que en realidad $s \in N$, pues podemos tomar una biyección $f : |\mathbb{P}_\beta| \longrightarrow \mathbb{P}_\beta$ tal que $f \in N$, con lo que existe un $\delta \in N[G_\alpha]$ tal que $f(\delta) = s$ y, como N y $N[G_\alpha]$ tienen los mismos ordinales, de hecho $\delta \in N$ y $s = f(\delta) \in N$.

Pongamos que $s = \sigma_{0G_\alpha}$, donde q_0 fuerza que σ_0 tiene las propiedades anteriores, es decir, que $\sigma_0 \in N \cap \mathbb{P}_\beta/\Gamma_\alpha \wedge \sigma \leq \pi|_{\check{\beta}}$ y que existe una sucesión r en las condiciones de la hipótesis f) de modo que además¹¹

$$\sigma_0 \Vdash \delta_{\check{\beta}}(r, \check{\phi}) \text{ respeta a } \check{g} \text{ y extiende a } \check{\pi}.$$

Ahora aplicamos el teorema 10.20 (tomando como γ de 10.20 el ordinal que aquí llamamos β y $\gamma_0 = \alpha$). Obtenemos entonces una condición (N, \mathbb{P}_β) -genérica q_1 tal que $q_1|_\alpha = q_0$ y $q_1 \Vdash i_{\alpha\beta}(\sigma_0) \in \Gamma$. Vamos a probar que q_1 cumple lo requerido. Para ello fijamos un filtro \mathbb{P}_β -genérico sobre M tal que $q_1 \in G_\beta$ y llamamos $G_\alpha = i_{\alpha\beta}^{-1}[G_\beta]$, de modo que $q_0 \in G_\alpha$, luego $q_1 \in \mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ y G_β es también $\mathbb{P}_\beta/G_\alpha$ -genérico sobre $M[G_\alpha]$.

Llamamos $p = \pi_{G_\alpha} \in N \cap \mathbb{P}_\gamma/G_\alpha$ y $s = \sigma_{0G_\alpha} \in N \cap (\mathbb{P}_\beta/G_\alpha)$ (más aún, $s = i_{\alpha\beta}(\sigma_0)|_{G_\beta} \in G_\beta$) de modo que se siguen cumpliendo todos los hechos que teníamos antes: $s \leq p|_\beta$ (luego $p|_\beta \in G_\beta$, luego $p \in \mathbb{P}_\gamma/G_\beta$, y con esto ya tenemos que $q_1 \Vdash i_{\alpha\beta}(\pi) \in \mathbb{P}_\gamma/\Gamma_\beta$, como había que probar), existe una sucesión $r = \{r_n\}_{n \in \omega}$ en $N[G_\alpha] \cap (\mathbb{P}_\gamma/G_\alpha)$ que extiende a p , interpreta a $\phi_{G_\alpha}^\gamma$ y respeta a g , y además la sucesión $\{s_n\}_{n \in \omega} \in \mathbb{P}_\gamma/G_\beta$ construida a partir de $\{r_n\}_{n \in \omega}$ y ϕ también extiende a p , interpreta a $\phi_{G_\beta}^\gamma$ (por construcción) y respeta a g . ■

Ahora ya podemos probar la conservación de la acotación de ${}^\omega\omega$:

Teorema 10.51 *Si $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \gamma}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \gamma})$ una iteración con soportes numerables de preórdenes propios y separativos que acotan ${}^\omega\omega$, entonces cada \mathbb{P}_δ acota ${}^\omega\omega$.*

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Razonamos por inducción sobre δ . Para $\delta = 0$ es trivial. Si \mathbb{P}_δ acota ${}^\omega\omega$ es claro que lo mismo vale para $\mathbb{P}_{\delta+1} \cong \mathbb{P}_\delta * \pi_\delta$, pues si $G * H$ es un filtro $\mathbb{P}_\delta * \pi_\delta$ -genérico sobre M tenemos que $M[G * H] = M[G][H]$ y sabemos que tanto \mathbb{P}_δ (por hipótesis de inducción) como $(\pi_\delta)_G$ (por hipótesis) acotan ${}^\omega\omega$, luego todo $f \in {}^\omega\omega \cap M[G * H]$ está acotado por una función en $M[G]$ que a su vez está acotada por una función en M .

¹¹En \check{g} hay que entender que $\check{g} \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ y el siguiente $\check{}$ (al igual que el de $\check{\phi}$) representa al nombre canónico respecto de $\mathbb{P}_\beta/\Gamma_\alpha$.

Consideremos, pues, el caso de un ordinal límite. No perdemos generalidad si suponemos que es el propio γ . Fijamos $\phi \in M^{\mathbb{P}_\gamma}$ tal que $\mathbf{1} \Vdash \phi \in {}^\omega\omega$ y una condición $p_0 \in \mathbb{P}_\gamma$, y hemos de encontrar $g \in {}^\omega\omega \cap M$ y $p \leq p_0$ de modo que $p \Vdash \phi < \check{g}$. (Así, el conjunto de las condiciones p que cumplen esto para cierta g es denso y corta a todo filtro genérico.)

Fijemos un cardinal regular^M κ suficientemente grande y sea $N \prec H(\kappa)^M$ numerable tal que $\gamma, \mathbb{P}_\gamma, \phi, p_0 \in N$. Sea $\{\gamma_n\}_{n \in \omega}$ una sucesión cofinal creciente en $\gamma^* = N \cap \gamma$. Podemos suponer que $\gamma_0 = 0$. Sea $r = \{r_n\}_{n \in \omega}$ una sucesión decreciente de condiciones de \mathbb{P}_γ tal que $r_0 = p_0$ y que interprete a ϕ como una cierta $f^* \in {}^\omega\omega \cap M$. Podemos exigir que $r, f^* \in N$. Sea $g \in {}^\omega\omega \cap M$ una función que acote finalmente a ${}^\omega\omega \cap N$ y tal que $f^* < g$. Basta encontrar $q \leq p_0$ tal que $p \Vdash \phi < \check{g}$.

Para ello vamos a construir recurrentemente sucesiones $\{q_n\}_{n \in \omega}$ y $\{\pi_n\}_{n \in \omega}$ de modo que $q_n \in \mathbb{P}_{\gamma_n}$, $\pi_n \in M^{\mathbb{P}_{\gamma_n}}$ y se cumplan las propiedades siguientes:

- a) $q_0 = \mathbf{1}$, q_n es $(N, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérica y $q_{n+1}|_{\gamma_n} = q_n$.
- b) $\pi_0 = \check{p}_0$ y $q_n \Vdash \pi_n \in \check{N} \cap (\check{\mathbb{P}}_\gamma / \Gamma_{\gamma_n}) \wedge \pi_n \leq i_{\gamma_{n-1}\gamma_n}(\pi_{n-1})$.
- c) $q_n \Vdash \pi_n$ determina a $\phi_{\Gamma_{\gamma_n}}^\gamma|_{\check{n}}$ y $\pi_n \Vdash \phi_{\Gamma_{\gamma_n}}^\gamma|_{\check{n}} < \check{g}|_{\check{n}}$.
- d) q_n fuerza que en $\check{N}[\Gamma]$ existe una sucesión decreciente de condiciones de $\mathbb{P}_\gamma / \Gamma_{\gamma_n}$ bajo π_n que interpreta $\phi_{\Gamma_{\gamma_n}}^\gamma$ y respeta \check{g} .

Admitiendo que existan estas sucesiones, basta tomar $q^* = \bigcup_{n \in \omega} q_n \in \mathbb{P}_{\gamma^*}$ y $q = i_{\gamma^*\gamma}(q^*) \in \mathbb{P}_\gamma$. En efecto, si G es un filtro \mathbb{P}_γ -genérico sobre M tal que $q \in G$, entonces $q_n = q|_{\gamma_n} \in G_{\gamma_n}$ y podemos considerar $p_n = (\pi_n)_{G_{\gamma_n}} \in \mathbb{P}_\gamma$, que forman una sucesión decreciente (en la que p_0 es la condición de la que hemos partido). Además, $p_n|_{\gamma_n} \in G_{\gamma_n}$, luego, de hecho, $p_n|_{\gamma_m} \in G_{\gamma_m}$ para todo $m \geq n$, ya que $p_m|_{\gamma_m} \leq p_n|_{\gamma_m}$, luego $p_n|_{\gamma^*} \in G_{\gamma^*}$, por 8.25 y, como $\text{sop } p_n \subset \gamma^*$, porque $p_n \in N$, de hecho $p_n \in G$. En particular esto prueba que $q \Vdash \check{p}_0 \in \Gamma$, luego $q \leq p_0$. La propiedad c) nos da que existe $s_n \in {}^n\omega$ tal que $p_n \Vdash \phi_{G_{\gamma_n}}^\gamma|_{\check{n}} = \check{s}_n$ y $s_n < g|_n$, lo que a su vez se traduce en que $\phi_G|_n = s_n < g|_n$, luego $\phi_G < g$.

Pasamos a construir las sucesiones requeridas. En primer lugar, teniendo en cuenta que $\gamma_0 = 0$, es claro que $q_0 = \mathbf{1}$ y $\pi_0 = \check{p}_0$ cumplen trivialmente todo lo necesario. La sucesión que cumple d) es la sucesión r que habíamos tomado.

Supongamos definidos q_n y π_n . Consideremos un filtro \mathbb{P}_{γ_n} -genérico sobre M tal que $q_n \in G_{\gamma_n}$. En particular G_{γ_n} es $(N, \mathbb{P}_{\gamma_n})$ -genérico. Entonces, por la propiedad d), en $N[G_{\gamma_n}]$ existe una sucesión decreciente $r = \{r_n\}_{n \in \omega}$ de condiciones de $\mathbb{P}_\gamma / G_{\gamma_n}$ por debajo de $p_n = (\pi_n)_{G_{\gamma_n}}$ que interpreta a $\phi_{G_{\gamma_n}}^\gamma$ y respeta a g . Definimos $p_{n+1} = r_{n+1}$, que determina a $\phi_{G_{\gamma_n}}^\gamma|_{n+1}$, es decir, existe un $v \in {}^{n+1}\omega$ tal que $p_{n+1} \Vdash \phi_{G_{\gamma_n}}^\gamma|_{\check{n}+1} = \check{v}$ y $v < g|_{n+1}$. Sea $\pi_{n+1}^* \in M^{\mathbb{P}_{\gamma_n}}$ tal que $p_{n+1} = (\pi_{n+1}^*)_{G_{n+1}}$. Podemos exigir que q_0 fuerce que π_{n+1}^* es el término $\check{n}+1$ de una sucesión r que cumpla la condición d). En particular, tenemos que $q_0 \Vdash \pi_{n+1}^* \in \check{N} \cap (\mathbb{P}_\gamma / \Gamma_{\gamma_n})$. Llamamos $\pi_{n+1} = i_{\gamma_n\gamma_{n+1}}(\pi_{n+1}^*)$.

Finalmente aplicamos el teorema anterior a:

$$\begin{array}{c} \alpha \quad \beta \quad \gamma \quad q_0 \quad \pi \\ \hline \gamma_n \quad \gamma_{n+1} \quad \gamma \quad q_n \quad \pi_{n+1}^* \end{array}$$

Observemos que la condición f) del teorema anterior se cumple con la sucesión que resulta de eliminar los primeros términos a la sucesión dada por la condición d). Concluimos que existe una condición $(N, \mathbb{P}_{\gamma_{n+1}})$ -genérica q_{n+1} que cumple $q_{n+1}|_{\gamma_n} = q_n$ así como que $q_{n+1} \Vdash \pi_{n+1} \in \mathbb{P}_\gamma / \Gamma_{\gamma_{n+1}}$ y la propiedad d) para $n + 1$. Tenemos, por lo tanto, que se cumple también a) y, en cuanto a b) y c), se comprueban inmediatamente tomando un filtro $\mathbb{P}_{\gamma_{n+1}}$ -genérico usando que q_n y π_{n+1}^* cumplen las propiedades análogas. ■

Capítulo XI

Aplicaciones de las extensiones propias

En el capítulo anterior hemos explicado que la construcción que hemos visto en el capítulo VIII de un modelo transitivo de ZFC + HS no puede modificarse ligeramente para obtener un modelo en el que además se cumpla la hipótesis del continuo, sino que, al ser necesaria una iteración de c.p.o.s con la c.c.n. de longitud al menos ω_2 (para garantizar que colapsamos todo árbol de Suslin que pueda ir surgiendo durante la iteración), es necesario que en el modelo resultante se viole la hipótesis del continuo, al menos si tomamos soportes finitos.

El hecho de que la hipótesis del continuo “se resista” a conservarse en un modelo de HS podría llevarnos a sospechar si no será que $2^{\aleph_0} = \aleph_1 \rightarrow \neg\text{HS}$. En [TC 9.19] hemos visto que $\Diamond \rightarrow \neg\text{HS}$, y en [TC 6.28] demostramos $\Diamond \rightarrow 2^{\aleph_0} = \aleph_1$. Podría ocurrir que en realidad bastara $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ para probar $\neg\text{HS}$. Incluso, a la vista de [TC 6.29], que afirma que $\Diamond_{\kappa^+} \leftrightarrow 2^\kappa = \kappa^+$ siempre que $\kappa > \aleph_0$, podría sospecharse que lo mismo vale para $\kappa = \aleph_0$, es decir, que $\Diamond \leftrightarrow 2^{\aleph_0} = \aleph_1$.

Sin embargo, sucede que no es así. Jensen demostró que la hipótesis de Suslin es consistente con la hipótesis del continuo generalizada. Para ello realizó una construcción muy complicada cuyo “esqueleto” era una iteración con soportes numerables. El modelo obtenido por Jensen es, en particular, un modelo de $2^{\aleph_0} = \aleph_1 + \neg\Diamond + \text{HS}$. Por lo tanto, la hipótesis del continuo no implica por sí sola ni \Diamond ni $\neg\text{HS}$. Aquí vamos a probar este hecho con una simplificación drástica del argumento de Jensen gracias a los resultados de Shelah sobre extensiones propias que hemos presentado en el capítulo anterior. Nos ocupamos de ello en la sección 11.2, pero antes exponemos en la sección 11.1 una prueba que técnicamente es algo bastante más sencilla, a saber, la prueba de la consistencia de que no existan p -puntos en ω^* .

El lector que quiera compaginar el estudio de estos ejemplos con el de la teoría del capítulo anterior deberá tener en cuenta que la sección 11.1 sólo requiere las secciones 10.1, 10.3 (hasta el teorema 10.20 más el teorema 10.26, que no depende de los anteriores) y la sección 10.6.

11.1 Un modelo sin p-puntos

Recordemos que en 9.21 hemos probado la consistencia de que existan p -puntos en ω^* (en particular, es una consecuencia de la hipótesis del continuo). Veamos ahora que es posible construir un modelo en el que no los haya (en el que necesariamente tiene que fallar la hipótesis del continuo).

Definición 11.1 Si $X \subset \omega$ es un conjunto infinito, llamaremos f_X a la única semejanza $f_X : \omega \longrightarrow X$. Si F es un filtro en ω que no contenga conjuntos finitos, definimos $\overline{F} = \{f_X \mid X \in F\}$, donde \leq^* es la relación definida en 10.47.

Diremos que el filtro F *no está acotado* si el conjunto \overline{F} no está (finalmente) acotado, en el sentido de que no existe ninguna $g \in {}^\omega\omega$ tal que $\bigwedge f \in \overline{F} f \leq^* g$.

Veamos algunas caracterizaciones:

Teorema 11.2 *Sea F un filtro en ω que no contenga conjuntos finitos. Entonces, las afirmaciones siguientes son equivalentes:*

- a) *F no está acotado.*
- b) *Para toda función (estrictamente creciente) $g \in {}^\omega\omega$ existe un $X \in F$ tal que $|X \cap g(k)| \leq k$ para infinitos valores de k .*
- c) *Para toda función $h : \omega \longrightarrow \omega$ creciente y suprayectiva, existe un $X \in F$ tal que $|X \cap k| \leq h(k)$ para infinitos valores de k .*

DEMOSTRACIÓN: Observemos en primer lugar que en la definición de filtro no acotado podemos exigir que g sea estrictamente creciente, pues dada cualquier función $g \in {}^\omega\omega$, podemos construir $g^* \in {}^\omega\omega$ estrictamente creciente tal que $g <^* g^*$. En efecto, basta definir $g^*(n)$ como el menor natural mayor que $g(n)$ y que todos los elementos de $g^*[n]$. De este modo, si g acota \overline{F} , también lo hace g^* .

a) \Rightarrow b) Dada g , tiene que existir un $X \in F$ tal que $\neg f_X \leq^* g$, lo que significa que $g(k) < f_X(k)$ para infinitos valores de k , y implica claramente a que $|X \cap g(k)| \leq k$ (pues todo elemento de $X \cap g(k)$ es menor que el $k+1$ -ésimo elemento de X , luego a lo sumo hay k elementos en la intersección).

b) \Rightarrow a) Dada g (que podemos suponer creciente), tomamos $g^*(k) = g(k)+1$, que también es creciente, luego existe un $X \in F$ tal que $|X \cap g^*(k)| \leq k$ para infinitos valores de k , pero esto equivale a que $g(k) < g^*(k) \leq f_X(k)$, pues si fuera $f_X(k) < g^*(k)$ entonces en $X \cap g^*(k)$ habría al menos $k+1$ elementos.

b) \Rightarrow c) Sea h creciente y suprayectiva y sea $g \in {}^\omega\omega$ la función dada por $g(n) = \min g^{-1}[\{n\}]$. Claramente es estrictamente creciente, luego existe $X \in F$ tal que $|X \cap g(k)| \leq k$ para infinitos valores de k . Cada uno de ellos será de la forma $k = h(g(k))$, de modo que $|X \cap g(k)| \leq h(g(k))$, que es lo mismo que $|X \cap k'| \leq h(k')$, para infinitos valores de $k' = g(k)$.

c) \Rightarrow b) Si g es estrictamente creciente, definimos h mediante

$$h(n) = g^{-1}(\max(g[\omega] \cap (n+1))),$$

que claramente es creciente y suprayectiva. Sea $X \in F$ tal que $|X \cap k| \leq h(k)$ para infinitos valores de k . Para cada uno de ellos, $g(h(k)) \leq k$, luego también se cumple que $|X \cap g(h(k))| \leq h(k)$, luego $|X \cap g(k')| \leq k'$ para los infinitos $k' = h(k)$. ■

Veamos otra caracterización un poco más sofisticada:

Teorema 11.3 *Un filtro F en ω que no contenga conjuntos finitos es no acotado si y sólo si para toda sucesión estrictamente creciente de números naturales $\{n_k\}_{k \in \omega}$ existe un $X \in F$ tal que $X \cap [n_k, n_{k+1}[= \emptyset$ para infinitos valores de k .*

DEMOSTRACIÓN: Si F no está acotado, dada una sucesión $\{n_k\}_{k \in \omega}$, definimos $g \in {}^\omega\omega$ mediante $g(i) = n_{2i}$. Entonces existe un $X \in F$ tal que $\neg f_X \leq^* g$, es decir, para todo $m \in \omega$ existe un $i > m$ tal que $g(i) < f_X(i)$. Esto significa que $|X \cap g(i)| \leq i$, es decir, que $|X \cap n_{2i}| \leq i$. Si X cortara a cada intervalo $[n_k, n_{k+1}[$, para $k = m, \dots, 2i-1$, entonces $|X \cap n_{2i}| \geq 2i-m > i$, luego existe un $k \geq m$ tal que $X \cap [n_k, n_{k+1}[= \emptyset$.

Si F cumple esta condición, tomamos $g \in {}^\omega\omega$ y vamos a probar que no acota a \overline{F} . Sea $g' \in {}^\omega\omega$ dada por $g'(k) = g(k) + k + 1$. Entonces la sucesión dada por $n_0 = 0$ y $n_{k+1} = g'(n_k)$ es estrictamente creciente. Por lo tanto, existe $X \in F$ que cumple la condición del enunciado.

Dado $n \in \omega$, podemos tomar $k \in \omega$ tal que $n_k \geq n$ y $X \cap [n_k, n_{k+1}[= \emptyset$. Entonces $X \cap n_{k+1} = X \cap n_k$, luego

$$|X \cap g'(n_k)| = |X \cap n_{k+1}| = |X \cap n_k| \leq n_k,$$

luego $f_X(n_k) \geq g'(n_k) > g(n_k)$, luego g no acota a f_X . ■

Como consecuencia:

Teorema 11.4 *Todo ultrafiltro libre en ω es no acotado.*

DEMOSTRACIÓN: Sea U un ultra filtro libre. Vamos a probar que no está acotado usando la caracterización del teorema anterior. Tomamos una sucesión estrictamente creciente $\{n_k\}_{k \in \omega}$ y definimos $X = \bigcup_{k \in \omega} [x_{2k}, x_{2k+1}[$. Entonces $X \in U$ o bien $\omega \setminus X \in U$, y en ambos casos X es disjunto de infinitos intervalos determinados por la sucesión dada. ■

Definición 11.5 Sea F un filtro en ω y sea F' su ideal dual. Definimos \mathbb{P}_F como el conjunto de todas las aplicaciones $p : D \subset \omega \longrightarrow 2$ tales que $D \in F'$. Consideraremos a \mathbb{P}_F como c.p.o. con el orden dado por la inversa de la inclusión. Obviamente tiene máximo $\mathbf{1} = \emptyset$. También es claro que es separativo.

Teorema 11.6 Sea F un filtro no acotado en ω , sea $\mathbb{P} = \mathbb{P}_F$, sean $n \in \omega$, $p \in \mathbb{P}$ y $\sigma_0, \dots, \sigma_m \in V^\mathbb{P}$ tales que $\mathbb{1} \Vdash \sigma_i \in \omega$, para $i = 0, \dots, m$. Entonces existe $q \leq p$ y $H \subset \omega$ finito tal que $q|_{\omega \setminus n} \Vdash \sigma_i \in H$, para todo $i \leq m$.

DEMOSTRACIÓN: Sea $\{s_i\}_{i < 2^n}$ una enumeración de ${}^n\omega$. Podemos definir sucesiones $\{q_j\}_{j < 2^n}$ y $\{d_j\}_{j < 2^n}$ de condiciones y subconjuntos finitos de ω , respectivamente, de modo que $q_0 \leq p|_{\omega \setminus n}$ y además

- a) $\mathcal{D}q_j \cap n = \emptyset$,
- b) $s_j \cup q_j \Vdash \sigma_i \in s_j$, para $i = 0, \dots, m$,
- c) $q_{j+1} \leq q_j$.

En efecto, como $s_0 \cup p|_{\omega \setminus n} \Vdash \sigma_i \in \omega$, existe $q^* \leq s_0 \cup p|_{\omega \setminus n}$ y $d_0 \subset \omega$ finito de modo que $q^* \Vdash \sigma_i \in d_0$, para todo $i \leq m$, y definimos $q_0 = q^* \setminus s_0$. Supuesto definido q_j , razonamos igualmente a partir de que $s_{j+1} \cup q_j \Vdash \sigma_i \in \omega$. Basta tomar $H = \bigcup_{j < 2^n} s_j$ y $q = q_{2^n} \cup p|_n$.

En efecto, si relativizamos la construcción a un modelo transitivo numerable M de ZFC y tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q|_{\omega \setminus n} = q_{2^n} \in G$, como el conjunto de las condiciones definidas en n es denso en \mathbb{P} , existe un $j < 2^n$ tal que $s_j \cup q_{2^n} \in G$, con lo que $s_j \cup q_j \in G$, luego $(\sigma_i)_G \in s_j \subset H_j$ para todo $i \leq m$. ■

Observación El teorema anterior vale igualmente (con la misma prueba) si cambiamos ω por Ω . ■

Definición 11.7 Un p -filtro es un filtro F en ω que no contiene subconjuntos finitos y, para toda familia $\{A_n\}_{n \in \omega}$ de elementos de F existe $A \in F$ tal que cada $A \setminus A_n$ es finito. De este modo, un p -punto es un p -filtro que además es un ultrafiltro.

Teorema 11.8 Si F es un p -filtro no acotado en ω , entonces \mathbb{P}_F acota a ${}^\omega\omega$.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Llamemos $\mathbb{P} = \mathbb{P}_F$, sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y sea $f \in ({}^\omega\omega)^{M[G]}$. Entonces $f = \tau_G$, con $\tau \in M^\mathbb{P}$, y podemos suponer que

$$\mathbb{1} \Vdash \tau : \omega \longrightarrow \omega.$$

Sea $B = ({}^\omega\omega)^M$. Si f no estuviera acotada por B podríamos tomar una condición $p \in \mathbb{P}$ tal que

$$p \Vdash \bigwedge h \in \check{B} \ \tau \not\leq^* h.$$

A partir de aquí razonamos en M . Usando el teorema anterior podemos construir una sucesión decreciente de condiciones $\{q_n\}_{n \in \omega}$ y una sucesión $\{H_n\}_{n \in \omega}$ de subconjuntos finitos de ω de modo que $q_0 \leq p$ y $q_n|_{\omega \setminus n} \Vdash \tau(i) \in H_n$, para $i = 0, \dots, n$. Llamemos $X_n = \mathcal{D}q_n|_{\omega \setminus n} \in F'$. Como F es un p -filtro, existe

un $A \in F$ tal que cada $A \setminus (\omega \setminus X_n) = A \cap X_n$ es finito. Sea $g \in {}^\omega\omega$ tal que $A \cap X_n \subset [n, g(n)]$, con lo que

$$X = \bigcup_{n \in \omega} (X_n \setminus g(n)) = \bigcup_{n \in \omega} (X_n \setminus [n, g(n)]) \subset \omega \setminus A,$$

luego $X \in F'$. Definamos $n_0 = 0$ y $n_{i+1} = g(n_i) + 1$. Tenemos así una sucesión estrictamente creciente y, como F no está acotado, el teorema 11.3 nos da un $Y_0 \in F'$ tal que infinitos intervalos $[n_k, g(n_k)]$ están contenidos en Y_0 , luego, pasando a una subsucesión, podemos suponer que

$$Y = \bigcup_{k \in \omega} [n_k, g(n_k)] \subset Y_0,$$

luego $Y \in F'$. Definimos entonces $q = \bigcup_{k \in \omega} q_{n_k}|_{\omega \setminus n_k}$. Se cumple que $q \in \mathbb{P}$, pues su dominio es

$$\bigcup_{k \in \omega} X_{n_k} = \bigcup_{k \in \omega} ((X_{n_k} \setminus g(n_k)) \cup [n_k, g(n_k)]) \subset X \cup Y \in F'.$$

Además, como cada $q_{n_k} \leq p$, es claro que $q \cup p \in \mathbb{P}$. Por último definimos $h(k) = \max H_{n_k}$, de modo que $h \in B$, pero si tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \cup p \in G$, tenemos una contradicción, ya que p fuerza que $f = \tau_G$ no puede estar acotada por B , pero q fuerza que h acota a f . En efecto, para todo $k \in \omega$, tenemos que $q \leq q_{n_k}|_{\omega \setminus n_k}$, luego $q \Vdash \tau(\check{k}) \in H_{n_k}$, luego $f(k) \leq h(k)$. ■

Teorema 11.9 *Si F es un p -filtro no acotado, entonces \mathbb{P}_F es propio.*

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. En M , sea κ un cardinal regular suficientemente grande y sea $N \prec H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P} \in N$. Esto implica que $F \in N$. Sea $p \in \mathbb{P} \cap N$. Vamos a encontrarle una extensión (N, \mathbb{P}) -genérica.

Sea $\{\sigma_n\}_{n \in \omega} \in M$ una enumeración de todos los \mathbb{P} -nombres $\sigma \in M^\mathbb{P}$ tales que $\sigma \in N$ y $\mathbb{1} \Vdash \sigma \in \Omega$. Por la versión para Ω del teorema 11.6 podemos construir una sucesión decreciente de condiciones $\{q_n\}_{n \in \omega}$ y una sucesión $\{H_n\}_{n \in \omega}$ de subconjuntos finitos de Ω de modo que $q_0 \leq p$ y $q_n|_{\omega \setminus n} \Vdash \sigma_i \in H_n$, para $i \leq n$. Más aún, podemos exigir que cada q_n y cada¹ H_n esté en N (no podemos decir lo mismo de las sucesiones completas $\{q_n\}_{n \in \omega}$, $\{H_n\}_{n \in \omega}$ porque su construcción depende de la sucesión $\{\sigma_n\}_{n \in \omega}$, que no está en N).

A partir de aquí calcamos la prueba del teorema anterior para construir una sucesión $\{n_k\}_{k \in \omega}$ tal que $q = p \cup \bigcup_{k \in \omega} q_{n_k}|_{\omega \setminus n_k} \in \mathbb{P}$. Basta probar que q es (N, \mathbb{P}) -genérica.

Para ello basta probar a su vez que si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$, entonces $N[G] \cap \Omega = N \cap \Omega$. En efecto, si $\alpha \in N[G] \cap \Omega$, es claro que existe un $k \in \omega$ tal que $\alpha = (\sigma_k)_G$. Entonces, como $q \leq q_{n_k}|_{\omega \setminus n_k}$, tenemos que $q \Vdash \sigma_k \in H_{n_k}$, luego $\alpha \in H_{n_k} \subset N$. ■

¹Notemos que en la prueba de 11.6 se ve que los elementos de cada H_n son interpretaciones posibles de los nombres σ_i , por lo que son ordinales de $H(\kappa)$, lo que implica que $H_n \in H(\kappa)$.

Teorema 11.10 Si F es un p -filtro no acotado, existe otro p -filtro no acotado F^* tal que $\mathbb{P}_F^\omega \cong \mathbb{P}_{F^*}$, donde consideramos a \mathbb{P}_F^ω como c.p.o. con el orden definido componente a componente.

DEMOSTRACIÓN: Sea $f : \omega \times \omega \rightarrow \omega$ biyectiva. Para cada $X \subset \omega \times \omega$ y $n \in \omega$, definimos

$$X_{(n)} = \{m \in \omega \mid f(n, m) \in X\}.$$

Sea $F^* = \{X \in \mathcal{P}\omega \mid \bigwedge n \in \omega X_{(n)} \in F\}$. Definimos $\pi : \mathbb{P}_F^\omega \rightarrow \mathbb{P}_{F^*}$ de modo que $D\pi(p) = \{f(n, m) \mid m \in Dp_n\}$ y $\pi(p)(f(m, n)) = p_n(m)$. Claramente π es una semejanza. Sólo tenemos que probar que F^* es un p -filtro no acotado.

Para ver que es un p -filtro tomamos una familia $\{A_n\}_{n \in \omega}$ de elementos de F^* , de modo que los conjuntos $(A_n)_{(k)}$ están todos en F , luego existe un $Y \in F$ tal que $Y \setminus (A_n)_{(k)}$ es finito, para todo k y todo n . Sea

$$Y_k = Y \cap \bigcap_{n \leq k} (A_n)_{(k)} \in F$$

y definamos $A = \{f(k, m) \mid m \in Y_k\}$. De este modo $A_{(k)} = Y_k \in F$, luego se cumple que $A \in F^*$. Veamos que $A \setminus A_n$ es finito, para todo n . En efecto:

$$A \setminus A_n \subset \{f(k, m) \mid m \in Y_k \setminus (A_n)_{(k)}\} \subset \bigcup_{k \leq n} \{f(k, m) \mid m \in Y_k \setminus (A_n)_{(k)}\},$$

porque si $k > n$ entonces $Y_k \subset (A_n)_{(k)}$, y claramente la última unión es finita.

Veamos ahora que F^* no está acotado. Para ello vamos a exigir que f biecte cada $n \times n$ con n^2 . Emplearemos la caracterización dada por 11.2 c). Fijamos $h : \omega \rightarrow \omega$ creciente y suprayectiva. Podemos tomar $h^* : \omega \rightarrow \omega$ creciente y suprayectiva tal que $\bigwedge k \in \omega h^*(k)^2 \leq h(k^2)$. En efecto, definimos $h^*(0) = 0$ y, en general

$$h^*(n+1) = \begin{cases} h^*(n) & \text{si } h((n+1)^2) < (h^*(n)+1)^2, \\ h^*(n)+1 & \text{si } (h^*(n)+1)^2 \leq h((n+1)^2). \end{cases}$$

Como F no está acotado, existe $Y \in F$ tal que $|Y \cap k| \leq h^*(k)$ para infinitos valores de k . Definimos

$$X = \{f(n, m) \mid m \in Y \setminus f_Y(n)\} \in F^*.$$

Basta probar que $|X \cap k| \leq h^*(k)^2 \leq h(k)$ para infinitos valores de k . De hecho, vamos a probar que esto se cumple siempre que $|Y \cap k| \leq h^*(k)$. En efecto, en tal caso $(Y \setminus f_Y(n)) \cap k = \emptyset$ para todo $n \geq h^*(k)$, luego

$$\begin{aligned} X \cap k^2 &= \{f(n, m) \mid n < k \wedge m \in (Y \setminus f_Y(n)) \cap k\} \\ &= \bigcup_{n < h^*(k)} \{f(n, m) \mid m \in (Y \setminus f_Y(n)) \cap k\}, \end{aligned}$$

luego, como $|(Y \setminus f_Y(n)) \cap k| \leq |Y \cap k| \leq h^*(k)$, concluimos que

$$|X \cap k^2| \leq h^*(k)^2 \leq h(k^2).$$

■

Teorema 11.11 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea F un p -filtro no acotado M , sea G un filtro \mathbb{P}_F^ω -genérico sobre M , sea $\mathbb{P} \in M[G]$ un c.p.o. que acota a ${}^\omega\omega$ y sea H un filtro \mathbb{P} -genérico sobre $M[G]$. Entonces en $M[G][H]$ no hay p -puntos que contengan a F .*

DEMOSTRACIÓN: Supongamos que $P \in M[G][H]$ es un p -punto tal que $F \subset P$. Sea $\xi_n \in M^{\mathbb{P}_F^\omega}$ dado por

$$\xi_n = \{(p.o.(m, i), p) \mid p \in \mathbb{P}_F^\omega \wedge (m, i) \in p_n\}.$$

Los argumentos de densidad habituales prueban que $x_n = (\xi_n)_G \in ({}^\omega 2)^{M[G]}$. Más aún, es obvio que $\{x_n\}_{n \in \omega} \in M[G]$. Para cada n , tenemos que uno de los dos conjuntos siguientes está en P :

$$\{m \in \omega \mid x_n(m) = 0\}, \quad \{m \in \omega \mid x_n(m) = 1\}.$$

Por lo tanto, podemos definir $\epsilon \in ({}^\omega 2)^{M[G][H]}$ de modo que, para cada n , se cumpla que

$$\{m \in \omega \mid x_n(m) = \epsilon(n)\} \in P.$$

Supongamos en primer lugar que ϵ no es finalmente constante, con lo que podemos definir $f \in ({}^\omega\omega)^{M[G][H]}$ mediante

$$f(k) = \min\{i \in \omega \mid \forall j \in \omega (k < j < i \wedge \epsilon(k) = \epsilon(j))\}.$$

Como los dos c.p.o.s que estamos considerando acutan a ${}^\omega\omega$, existe $f^* \in ({}^\omega\omega)^M$ tal que $\bigwedge k \in \omega f(k) \leq f^*(k)$. Ahora definimos en M la sucesión dada por $k_0 = 0$ y $k_{n+1} = f^*(k_n)$. Notemos que es estrictamente creciente, pues se cumple que $k < f(k) \leq f^*(k)$. Además, si $k_n < j < f(k_n)$ cumple que $\epsilon(k_n) = \epsilon(j)$, según la definición de f , entonces también $k_n < f(k_n) \leq f^*(k_n) = k_{n+1}$, luego en definitiva tenemos que

$$\bigwedge n \in \omega \bigvee j \in \omega (k_n < j < k_{n+1} \wedge \epsilon(k_n) = \epsilon(j)).$$

Si ϵ es finalmente constante, digamos a partir de k_0 , entonces definimos $k_{n+1} = k_n + 2$, e igualmente se cumple la propiedad anterior. Definimos

$$A_n = \{m \in \omega \mid \forall j \in \omega (k_n < j < k_{n+1} \wedge x_{k_n}(m) = x_j(m))\} \in M[G].$$

Vamos a probar que $A_n \in P$. En efecto, para cada $k_n < j < k_{n+1}$ tenemos que

$$\{m \in \omega \mid x_{k_n}(m) = x_j(m)\} \subset A_n,$$

y por la construcción de la sucesión $\{k_n\}_{n \in \omega}$ existe un j tal que $\epsilon(k_n) = \epsilon(j)$, y por definición de ϵ

$$\{m \in \omega \mid x_{k_n}(m) = \epsilon(m)\}, \quad \{m \in \omega \mid x_j(m) = \epsilon(m)\} \in P,$$

luego la intersección también está en P :

$$\{m \in \omega \mid x_{k_n}(m) = x_j(m) = \epsilon(m)\} \subset \{m \in \omega \mid x_{k_n}(m) = x_j(m)\} \in P,$$

luego $A_n \in P$. Como P es un p -punto, existe $X \in P$ tal que $X \setminus A_n$ es finito, para todo n . En otras palabras, existe $g \in (\omega^\omega)^{M[G][H]}$ tal que $X \subset A_n \cup g(n)$. Más aún, usando de nuevo que los c.p.o.s acotan a ω^ω podemos suponer que $g \in (\omega^\omega)^M$. Entonces $X \subset \bigcap_{n \in \omega} (A_n \cup g(n)) \in P$. En particular

$$\neg \forall Y \in F' \bigcap_{n \in \omega} (A_n \cup g(n)) \subset Y,$$

donde F' es el ideal dual de F , ya que si existiera tal Y estaría en P' , y la intersección también.

Recordemos que cada x_n tiene un nombre canónico $\xi_n \in M^{\mathbb{P}_F^\omega}$. Más aún, la sucesión $\{x_n\}_{n \in \omega}$ tiene por nombre canónico a

$$\xi = \{(p.o.(\check{n}, \xi_n), \mathbb{1}) \mid n \in \omega\} \in M^{\mathbb{P}_F^\omega}.$$

Consideramos ahora $\sigma_n \in M^{\mathbb{P}_F^\omega}$ tal que

$$\mathbb{1} \Vdash \sigma_n = \{m \in \omega \mid \forall j \in \omega (\check{k}_n < j < \check{k}_{n+1} \wedge \xi_{\kappa_n}(m) = \xi_j(m))\}.$$

Así $(\sigma_n)_G = A_n$. Vamos a probar que

$$\mathbb{1} \Vdash \forall Y \in \check{F}' \bigcap_{n \in \omega} (\sigma_n \cup \check{g}(n)) \subset Y.$$

con lo que tendremos una contradicción. Basta probar que el conjunto de las condiciones que fuerzan dicha sentencia es denso en \mathbb{P}_F^ω . Fijamos una condición $p \in \mathbb{P}_F^\omega$ y vamos a encontrar una extensión que cumpla lo requerido. Tenemos que $p = \{p_j\}_{j \in \omega}$, y cada p_j tiene su dominio en F' . Sea

$$Y_n = \bigcup_{k_n \leq j < k_{n+1}} \mathcal{D}p_j \in F'.$$

Como F es un p -filtro, existe un $Y \in F'$ tal que $Y_n \setminus Y$ es finito, para todo n , luego existe $h \in \omega^\omega$ tal que $\bigwedge n \in \omega Y_n \setminus h(n) \subset Y$. Podemos tomar h estrictamente creciente y tal que $\bigwedge n \in \omega g(n) \leq h(n)$. Más aún, cambiando Y por un conjunto mayor podemos suponer que $h(0) \subset Y$.

Definimos como sigue una condición $q = \{q_j\}_{j \in \omega} \in \mathbb{P}_F^\omega$: Si $j < k_0$, tomamos $q_j = p_j$. En caso contrario existe un único n tal que $k_n \leq j < k_{n+1}$ y definimos q_j de modo que $\mathcal{D}q_j = \mathcal{D}p_j \cup \{m \in \omega \mid h(n) \leq m < h(n+1)\}$ y

$$q_j(m) = \begin{cases} p_j(m) & \text{si } m \in \mathcal{D}p_j, \\ 1 & \text{si } m \notin \mathcal{D}p_j \wedge j = k_n, \\ 0 & \text{si } m \notin \mathcal{D}p_j \wedge j > k_n. \end{cases}$$

Es inmediato que $q \in \mathbb{P}_F^\omega$, así como que $\bigwedge j \in \omega p_j \subset q_j$, luego $q \leq p$. Sólo falta ver que si G es un filtro \mathbb{P}_F^ω -genérico sobre M tal que $q \in G$ entonces

$$\bigcap_{n \in \omega} (A_n \cup g(n)) \subset Y.$$

Tomamos, pues, $m \in \bigcap_{n \in \omega} (A_n \cup g(n))$. Si $m < h(0)$, basta tener en cuenta que $h(0) \subset Y$. En caso contrario existe un único $n \in \omega$ tal que $h(n) \leq m < h(n+1)$. Basta probar que $m \in Y_n$, pues entonces $m \in Y_n \setminus h(n) \subset Y$. En caso contrario, por definición de Y_n , para cada $k_n \leq j < k_{n+1}$ se cumple que $m \notin Dp_j$ y para $j \neq k_n$ se cumple que $q_{k_n}(m) = 1 \neq 0 = q_j(m)$, por definición de q . Como $q \in G$, esto implica que $x_{k_n}(m) \neq x_j(m)$, luego $m \notin A_n$, por definición de A_n . Por otra parte, como $g(n) \leq h(n)$, tenemos que $m \notin g(n)$, luego llegamos a que $m \notin A_n \cup g(n)$, en contradicción con la elección de m . ■

Teorema 11.12 *Si M es un modelo transitivo numerable de ZFC en el que se cumple $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ y $2^{\aleph_1} = \aleph_2$, entonces existe una extensión genérica de M con los mismos cardinales, las mismas cofinalidades y la misma función del continuo, salvo que $2^{\aleph_0} = \aleph_2$, en la que no existen p -puntos.*

DEMOSTRACIÓN: Vamos a construir en M una iteración $\{\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \omega_2}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \omega_2}\}$ con soportes numerables junto con una sucesión $\{\phi_\delta\}_{\delta < \omega_2}$ de modo que, para cada $\delta < \omega_2$, se cumpla que $\phi_\delta \in M^{\mathbb{P}_\delta}$ y

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \phi_\delta \text{ es un } p\text{-filtro no acotado} \wedge \pi_\delta = \mathbb{P}_{\phi_\delta}^\omega.$$

Veamos que, en estas condiciones, para cada $\delta < \omega_2$ se cumple

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash 2^{\aleph_0} = \aleph_1 \wedge |\pi_\delta| = \aleph_1.$$

En efecto, si es cierto para todo $\delta < \gamma < \omega_2$, entonces por el teorema 10.39 tenemos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \pi_\delta$ es \aleph_2 -propio sobre isomorfismos, luego por 10.45 también lo es \mathbb{P}_γ , luego por 10.40 tenemos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\gamma} \Vdash 2^{\aleph_0} = \aleph_1$, y es claro entonces que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\gamma} \Vdash |\pi_\gamma| = \aleph_1$ (pues si se cumple la hipótesis del continuo el cardinal de un c.p.o. \mathbb{P}_F^ω es claramente \aleph_1).

Más aún, por 10.46, para todo $\delta \leq \omega_2$ tenemos que \mathbb{P}_δ cumple la c.c. \aleph_2 . Como también es propio, concluimos que conserva cardinales y cofinalidades.

Vamos a ver que en estas circunstancias (razonando en M), para cada $\delta < \omega_2$, existe un conjunto $\bar{\pi}_\delta \subset \hat{\pi}_\delta$ tal que $|\bar{\pi}_\delta| \leq \omega_1$ y para todo $\sigma \in \hat{\pi}_\delta$ existe un $\bar{\sigma} \in \bar{\pi}_\delta$ tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \sigma = \bar{\sigma}$. Podemos suponer además que $\mathbb{1}_{\pi_\delta} \in \bar{\pi}_\delta$.

En efecto, si G_δ es un filtro \mathbb{P}_δ -genérico sobre M , tenemos que en $M[G_\delta]$ se cumple que $2^{\aleph_0} = \aleph_1$, luego $|(\pi_\delta)_{G_\delta}| = \aleph_1$, luego

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \forall f : \omega_1 \longrightarrow \pi_\delta \text{ suprayectiva} \wedge f(0) = \mathbb{1}_{\pi_\delta},$$

luego podemos tomar un nombre σ_δ tal que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \sigma_\delta : \omega_1 \longrightarrow \pi_\delta \text{ suprayectiva} \wedge \sigma_\delta(0) = \mathbb{1}_{\pi_\delta}.$$

Para cada $\alpha < \omega_1$, tenemos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \forall x \in \pi_\delta \ x = \sigma_\delta(\check{\alpha})$, luego existe un $\xi_\alpha \in \hat{\pi}_\delta$ tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \xi_\alpha = \phi_\delta(\check{\alpha})$. Concretamente, podemos elegir $\xi_0 = \mathbb{1}_{\pi_\delta}$. Ahora basta tomar $\bar{\pi}_\delta = \{\xi_\alpha \mid \alpha < \omega_1\}$.

Observamos ahora que el subconjunto $\bar{\mathbb{P}}_\delta \subset \mathbb{P}_\delta$ formado por $p \in \mathbb{P}_\delta$ tales que $\bigwedge \epsilon < \delta p(\epsilon) \in \bar{\pi}_\epsilon$ es denso en \mathbb{P}_δ . En efecto, dada cualquier condición $p \in \mathbb{P}_\delta$, podemos formar otra condición \bar{p} de modo que $\bigwedge \epsilon < \delta \mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \bar{p}(\epsilon) = p(\epsilon)$, y es claro entonces que, ciertamente, $\bar{p} \in \mathbb{P}_\delta$ (y entonces de hecho $\bar{p} \in \bar{\mathbb{P}}_\delta$) y $\bar{p} \leq p \wedge p \leq \bar{p}$.

Además, para $\delta < \omega_2$, se cumple que $|\bar{\mathbb{P}}_\delta| \leq \aleph_1$. En efecto, para $\bar{\mathbb{P}}_0 = \{\mathbb{1}\}$ es trivial. Si vale para δ , entonces $|\bar{\mathbb{P}}_{\delta+1}| = |\bar{\mathbb{P}}_\delta \times \bar{\pi}_\delta| \leq \aleph_1$, y si vale para todo $\delta < \lambda < \omega_2$, entonces λ tiene a lo sumo $\aleph_1^{\aleph_0} = (2^{\aleph_0})^{\aleph_0} = \aleph_1$ subconjuntos numerables. Para cada uno de ellos, digamos s , (un posible soporte de una condición), $\bigcup_{\delta \in s} \bar{\pi}_\delta$ tiene cardinal \aleph_1 , luego hay a lo sumo $\aleph_1^{\aleph_0} = \aleph_1$ condiciones en $\bar{\mathbb{P}}_\lambda$ con soporte s , luego hay a lo sumo $\aleph_1 \cdot \aleph_1 = \aleph_1$ condiciones en $\bar{\mathbb{P}}_\lambda$.

Un cálculo similar nos da que $|\bar{\mathbb{P}}_{\omega_2}| = \aleph_2$. A su vez, para $\delta \leq \omega_2$, si $\nu \geq \aleph_0$ es un cardinal (siempre en M), el teorema 5.20 nos da que el número de buenos \mathbb{P}_δ -nombres para subconjuntos de \check{v} es a lo sumo

$$|\bar{\mathbb{P}}_\delta|^{<\aleph_2\nu} \leq |\bar{\mathbb{P}}_\delta|^{\aleph_1\nu} \leq (2^{\aleph_1})^{\aleph_1\nu} = \begin{cases} 2^\nu & \text{si } \nu \geq \aleph_1, \\ \aleph_2 & \text{si } \nu = \aleph_0. \end{cases}$$

y el teorema 5.22 nos da entonces que, en una extensión genérica $M[G]$ de M (respecto de $\bar{\mathbb{P}}_\delta$), se cumplirá que $(2^\nu)^{M[G]} \leq (2^\nu)^M$ para $\nu \geq \aleph_1$, y la otra desigualdad es trivial. Obviamente, lo mismo vale para extensiones respecto de \mathbb{P}_δ , pues son las mismas, y por lo tanto la función del continuo se conserva en todos los pasos de la iteración, salvo que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash 2^{\aleph_0} \leq \aleph_2.$$

Cuando hayamos probado que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash \text{no existen } p\text{-puntos}$$

podremos concluir que, necesariamente, $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_{\omega_2}} \Vdash 2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_1} = \aleph_2$.

Antes de definir la iteración veamos qué podemos decir en el caso en que existe un filtro \mathbb{P}_{ω_2} -genérico sobre M tal que existe un p -punto $P \in M[G]$.

En todo lo que sigue, ω_2 representará a $\omega_2^M = \omega_2^{M[G]}$, e igualmente con otros cardinales.

Para cada $\alpha < \omega_2$, sea $F_\alpha = P \cap M[G_\alpha]$, donde, naturalmente, $G_\alpha = i_\alpha^{-1}[G]$. Tenemos que $F_\alpha \in M[G]$, pero no necesariamente $F_\alpha \in M[G_\alpha]$.

Claramente F_α es un filtro en el álgebra $(\mathcal{P}\omega)^{M[G_\alpha]}$. Diremos que es un *p-filtro no acotado respecto de $\beta \leq \alpha$* si

- Si $\{X_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\beta]$ es una familia de elementos de F_β , existe $X \in F_\alpha$ tal que $X \setminus X_n$ es finito, para todo n .
- Para cada $g \in {}^\omega\omega \cap M[G_\beta]$ existe un $X \in F_\alpha$ tal que $g \leq^* f_X$.

Veamos ahora que, para cada $\beta < \omega_2$, existe un $\beta < J(\beta) < \omega_2$ tal que $F_{J(\beta)}$ es un p -filtro no acotado respecto de β .

En efecto, dada $\{X_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\beta]$, sabemos que existe $X \in P$ tal que $X \setminus X_n$ es finito, para todo n . En particular $X \in M[G]$, y el teorema 8.24 nos da que existe un $\beta' < \omega_2$ tal que $X \in M[G_{\beta'}]$.

Como $M[G_\beta]$ cumple la hipótesis del continuo, hay \aleph_1 sucesiones posibles $\{X_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\beta]$, a cada una de las cuales le asignamos un ordinal β' tal que existe un $X \in M[G_{\beta'}]$ que cumpla lo requerido (la asignación se hace en $M[G]$). El conjunto de los β' está acotado en ω_2 por un cierto $\alpha_0 < \omega_2$, y para este α_0 (o cualquier ordinal mayor) se cumple que F_{α_0} es un p -filtro respecto de β .

Similarmente, dada $g \in {}^\omega\omega \cap M[G_\beta]$, existe $X \in F$ tal que $g \leq^* f_X$, y como antes podemos encontrar un $\beta' < \omega_2$ tal que $X \in M[G_{\beta'}]$. Igualmente, el número de aplicaciones g posibles es \aleph_1 , luego podemos encontrar un $\alpha_1 < \omega_2$ que acote a todos los β' posibles, y $J(\beta) = \max\{\beta+1, \alpha_0, \alpha_1\}$ cumple claramente lo requerido.

Veamos ahora que existe un $\alpha < \omega_2$ tal que F_α es un p -filtro no acotado respecto de α .

En efecto, basta definir recurrentemente una sucesión $\{\alpha_\delta\}_{\delta \leq \omega_1}$ mediante $\alpha_0 = 0$, $\alpha_{\delta+1} = J(\alpha_\delta)$ y $\alpha_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} \alpha_\delta$. Entonces $\alpha = \alpha_{\omega_1}$ cumple lo pedido. Notemos que $\text{cf } \alpha = \aleph_1$.

En efecto, si $\{X_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\alpha]$ es una familia en F_α , cada $X_n \in M[G]$, consideramos una biyección $f : \omega \times \omega \rightarrow \omega$ tal que $f \in M$ y definimos el conjunto $C = \bigcup_{n \in \omega} f[\{n\} \times X_n] \in M[G]$. Por 8.24 existe un $\beta < \alpha$ tal que $C \in M[G_\beta]$, lo que a su vez implica que $\{X_n\}_{n \in \omega} \in M[G_\beta]$. A su vez existe un $\delta < \omega_1$ tal que $\beta < \alpha_\delta$, luego $J(\beta) < J(\alpha_\delta) = \alpha_{\delta+1} < \alpha$. Por lo tanto, existe un $X \in M[G_{J(\beta)}] \subset M[G_\alpha]$ tal que $X \setminus A_n$ es finito, para todo n . Esto prueba que F_α es un p -filtro respecto de α , y la prueba de que no está acotado respecto de α es similar.

Ahora aplicamos 8.24 a $X = F_\alpha$, $S = (\mathcal{P}\omega)^{M[G_\alpha]}$. Esto es posible, pues $|S| = \aleph_1 < \text{cf } \omega_2$. La conclusión es que existe un $\epsilon < \omega_2$, que podemos tomar $> \alpha$, de modo que $F_\alpha \in M[G_\epsilon]$. Llamamos $F_\alpha^* \in M[G_\epsilon]$ al filtro generado por F_α en $(\mathcal{P}\omega)^{M[G_\epsilon]}$, es decir,

$$F_\alpha^* = \{X \in (\mathcal{P}\omega)^{M[G_\epsilon]} \mid \forall Y \in F_\alpha \quad Y \subset X\} \subset P.$$

Ahora probamos un hecho general que no depende de la hipótesis de reducción al absurdo que hemos supuesto:

Si $\alpha \leq \epsilon < \omega_2$ y $F \in M[G_\epsilon]$ es un p -filtro en $(\mathcal{P}\omega)^{M[G_\alpha]}$ no acotado respecto de α , entonces el filtro F^ generado por F en $(\mathcal{P}\omega)^{M[G_\epsilon]}$ es un p -filtro no acotado en $M[G_\epsilon]$.*

En efecto, por el teorema 10.26 sabemos que $M[G_\epsilon]$ es una extensión genérica de $M[G_\alpha]$ por un c.p.o. propio \mathbb{Q} que acota a ${}^\omega\omega$ (véase la nota posterior al

teorema, que se aplica igualmente a la propiedad de acotar a ${}^\omega\omega$ teniendo en cuenta 10.51).

Veamos que F^* no está acotado. Para ello supongamos que existe una función $g \in ({}^\omega\omega)^{M[G_\epsilon]}$ tal que para todo $X \in F^*$ se cumple que $f_X <^* g$. Como \mathbb{Q} acota a ${}^\omega\omega$, existe $g' \in ({}^\omega\omega)^{M[G_\alpha]}$ tal que $\bigwedge n \in \omega g(n) \leq g'(n)$. En particular, $\bigwedge X \in F_\alpha f_X <^* g'$, en contradicción con que F es un p -filtro no acotado respecto de α .

Para probar que F^* es un p -filtro tomamos una familia numerable $\{Z_n\}_{n \in \omega}$ de elementos de F^* . Como F^* es el filtro generado por F , podemos formar (en $M[G_\epsilon]$) una familia $\{Y_n\}_{n \in \omega}$ de conjuntos de F tales que $\bigwedge n \in \omega Y_n \subset Z_n$.

Sea $f \in M[G_\alpha]$ tal que $(f : \omega_1 \longrightarrow \mathcal{P}\omega)$ biyectiva. Entonces el conjunto $C = f^{-1}[\{Y_n \mid n \in \omega\}]$ está en $M[G_\epsilon]$ y es numerable. Como \mathbb{Q} es propio, el teorema 10.11 nos da que existe $C' \in M[G_\alpha]$ numerable tal que $C \subset C'$. Entonces $A = f[C'] \cap F$ es una familia numerable (en $M[G_\alpha]$) de elementos de F que contiene a $\{Y_n\}_{n \in \omega}$. Como F es un p -filtro existe $X \in F \subset F^*$ tal que cada $X \setminus U$ es finito para todo $U \in A$. En particular, cada $X \setminus Y_n$ es finito, y lo mismo vale para $X \setminus Z_n$.

En particular, volviendo a nuestra hipótesis de reducción al absurdo, en el supuesto de que existe un p -punto $P \in M[G]$ hemos probado que existe un $\epsilon < \omega_2$ tal que existe un $F \in M[G_\epsilon]$ que es un p -filtro no acotado y $F \subset P$.

Ahora ya podemos construir la iteración. Para ello consideramos una función $f : \omega_2 \longrightarrow \omega_2 \times \omega_2$ suprayectiva, $f \in M$, tal que

$$\bigwedge \alpha \beta \gamma \in \omega_2 (f(\alpha) = (\beta, \gamma) \rightarrow \beta \leq \alpha).$$

(Véase la prueba de 8.38.) Además de $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \omega_2}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \omega_2})$ y $\{\phi_\delta\}_{\delta < \omega_2}$, vamos a construir una sucesión $\{\Phi_\delta\}_{\delta < \omega_2}$ tal que $\Phi_\delta \in M^{\mathbb{P}_\delta}$ y

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \Phi_\delta : \omega_2 \longrightarrow \{F \mid F \text{ es un } p\text{-filtro no acotado}\} \text{ suprayectiva.}$$

Tomamos $\mathbb{P}_0 = \{\emptyset\}$ y, supuesta construida la iteración $(\{\mathbb{P}_\beta\}_{\beta \leq \alpha}, \{\pi_\beta\}_{\beta < \alpha})$ junto con las sucesiones $\{\phi_\beta\}_{\beta < \alpha}$ y $\{\Phi_\beta\}_{\beta < \alpha}$ en las condiciones indicadas, sabemos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash 2^{\aleph_0} = \aleph_1 \wedge 2^{\aleph_1} = \aleph_2$, de donde se sigue inmediatamente que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha}$ fuerza que hay como máximo \aleph_2 p -filtros no acotados. Esto nos permite escoger una función Φ_α en las condiciones requeridas.

Ahora calculamos $f(\alpha) = (\beta, \gamma)$ y, como $\beta \leq \alpha$, está definido Φ_β y

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \forall x x = \langle i_{\beta\alpha}(\Phi_\beta)(\check{\gamma}) \rangle,$$

donde $\langle \rangle$ representa al filtro generado en $\mathcal{P}\omega$. A su vez, existe un $\phi_\alpha \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \phi_\alpha = \langle i_{\beta\alpha}(\Phi_\beta)(\check{\gamma}) \rangle$.

Si G_α es un filtro \mathbb{P}_α -genérico sobre M tenemos que $(\Phi_\beta)_{G_\beta}(\gamma)$ es un p -filtro no acotado en $M[G_\beta]$, y hemos probado que el filtro que genera en $(\mathcal{P}\omega)^{M[G_\alpha]}$,

es decir, $(\phi_\alpha)_{G_\alpha}$ es también un p -filtro no acotado. Así pues, $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \phi_\alpha$ es un p -filtro no acotado. A su vez, existe $\pi_\alpha \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\alpha} \Vdash \pi_\alpha = \mathbb{P}_{\phi_\alpha}^\omega$.

Con esto queda definida la iteración $(\{\mathbb{P}_\beta\}_{\beta \leq \alpha+1}, \{\pi_\beta\}_{\beta < \alpha+1})$ junto con las sucesiones $\{\phi_\beta\}_{\beta < \alpha+1}$ y $\{\Phi_\beta\}_{\beta < \alpha+1}$. Para ordinales límite la iteración está completamente determinada por la propia definición de iteración (con soportes numerables).

Ahora volvemos a la reducción al absurdo: en el supuesto de que existe un p -punto $P \in M[G]$ hemos encontrado un $\epsilon < \omega_2$ tal que existe un p -filtro no acotado $F \in M[G_\epsilon]$ contenido en P . Entonces tiene que existir un $\gamma < \omega_2$ tal que $F = (\Phi_\epsilon)_{G_\epsilon}(\gamma)$, y a su vez existe un $\epsilon \leq \alpha < \omega_2$ tal que $f(\alpha) = (\epsilon, \gamma)$.

Entonces $F^* = (\phi_\alpha)_{G_\alpha} \subset P$ es el filtro generado por F en $(\mathcal{P}\omega)^{M[G_\alpha]}$, que también es un p -filtro no acotado, y por construcción $(\pi_\alpha)_{G_\alpha} = \mathbb{P}_{F^*}^\omega$.

Así pues el teorema 8.23 nos da que $M[G_{\alpha+1}] = M[G_\alpha][H]$, para cierto filtro $\mathbb{P}_{F^*}^\omega$ -genérico H sobre $M[G_\alpha]$ y el teorema 10.26 (véase la observación posterior) nos da que $M[G] = M[G_{\alpha+1}][H']$, para cierto filtro \mathbb{Q} -genérico H' sobre $M[G_{\alpha+1}]$ respecto de cierto c.p.o. \mathbb{Q} propio y que acota a ${}^\omega\omega$. En total tenemos que $M[G] = M[G_\alpha][H][H']$, y podemos aplicar el teorema 11.11, que nos asegura que en $M[G]$ no hay p -puntos que extiendan a F^* , cuando por otra parte P cumple esto. Esta contradicción prueba que en $M[G]$ no hay p -puntos. ■

11.2 Especialización de árboles de Aronszajn

Dado un árbol de Aronszajn T , vamos a definir un c.p.o. \mathbb{P}_T de manera que $\mathbb{1} \Vdash \check{T}$ es especial. Después, mediante una iteración de estos c.p.o.s, obtendremos un modelo en el que todo árbol de Aronszajn es especial. Ya hemos visto que AM implica este hecho, pero el modelo que obtendremos aquí cumplirá además la hipótesis del continuo, con lo que tendremos una prueba de que HC no implica ni \Diamond ni HS.

Antes de entrar en materia demostraremos un resultado técnico que vamos a necesitar más adelante sobre árboles de Aronszajn. Conviene introducir alguna notación:

Si T es un árbol de altura ω_1 y $n \in \omega$ es no nulo, llamaremos

$$T^n = \bigcup_{\alpha < \omega_1} (\text{Niv}_\alpha T)^n$$

al conjunto de n -tuplas de elementos de T de la misma altura. Se trata de un árbol con la relación dada por $x \leq x'$ si y sólo si $x_i \leq x'_i$ para todo $i \in n$.

Si $x \in T$ tiene altura α y $\gamma < \alpha$, representaremos por $x|_\gamma$ al único elemento de altura γ menor que x . En particular, si $x \in T^n$, tenemos que $x|_\gamma = (x_0|_\gamma, \dots, x_{n-1}|_\gamma)$. Si $B \subset T^n$ y $\gamma < \omega_1$, representamos $B_\gamma = B \cap \text{Niv}_\gamma T$. Si $B \subset \text{Niv}_\gamma T$ y $\beta < \gamma$, entonces $B|_\beta = \{x|_\beta \mid x \in B\}$.

Teorema 11.13 *Sea T un árbol de Aronszajn, sea $n \in \omega$ no nulo, sea $\alpha_0 < \omega_1$, sea $B \subset T^n$ un conjunto no numerable formado por elementos de altura $\geq \alpha$ y tal que si $x \in \text{Niv}_\gamma T^n$ con $\alpha \leq \gamma < \omega_1$ y $x \leq x' \in B$, también $x \in B$. Entonces existe $\alpha \leq \beta < \omega_1$ y $B' \subset B$ no numerable tal que:*

- a) *Si $\beta \leq \gamma_0 < \gamma_1 < \omega_1$, entonces $B'_{\gamma_0} = B'_{\gamma_1}|_{\gamma_0}$.*
- b) *Si $\beta \leq \gamma < \omega_1$, entonces B'_γ es disperso, es decir, para todo subconjunto finito $t \subset \text{Niv}_\gamma T$, existe $x \in B'_\gamma$ tal que $Rx \cap t = \emptyset$.*

DEMOSTRACIÓN: Dividimos la prueba en varios pasos:

- *Podemos suponer que cada $x \in B$ admite extensiones de cualquier altura numerable.*

En efecto, llamamos B^* al conjunto de los elementos de B que admiten extensiones de cualquier altura numerable. Si $\alpha \leq \gamma < \omega_1$ entonces $B_\gamma^* \neq \emptyset$, pues en caso contrario algún B_γ no contendría elementos con extensiones de cualquier altura numerable, pero eso es imposible, ya que todo elemento de B de altura mayor que γ se restringe a un elemento de B_γ (por hipótesis) y B_γ es numerable. Así pues B^* no es numerable, y basta probar que B^* contiene un subconjunto B' en las condiciones requeridas.

- *Si $\alpha \leq \gamma < \omega_1$, $x \in B_\gamma$ e $i < n$, para cada $p < \omega$ no nulo existen $\gamma \leq \gamma' < \omega_1$ y $x_0, \dots, x_{p-1} \in B_{\gamma'}$ tales que $x \leq x_j$ (para todo j) y los x_{ji} son distintos dos a dos.*

En efecto, en caso contrario sea p el máximo número natural para el que esto se cumple (trivialmente vale para $p = 1$). Sean x_0, \dots, x_{p-1} según el enunciado. Si z, z' son extensiones de x_0 de altura $\gamma'' \geq \gamma'$, necesariamente $z_i = z'_i$, pues, de lo contrario, extendiendo cada x_i , con $i > 0$ a un x'_i de altura γ'' tendríamos $p+1$ extensiones de x con las componentes i -ésimas distintas dos a dos. Así pues, las componentes i -ésimas de las extensiones de x_0 forman una cadena no numerable en T , en contradicción con que es un árbol de Aronszajn.

- *Si $\alpha \leq \gamma < \omega_1$ y $x \in B_\gamma$, existen $\gamma \leq \gamma' < \omega_1$ y $z, z' \in B_{\gamma'}$ tales que $x \leq z$, $x \leq z'$ y Rz, Rz' son disjuntos.*

En efecto, veamos por inducción sobre $k \leq n$ que podemos construir pares de extensiones z_k, z'_k de x de una misma altura tales que $z_k[k] \cap z'_k[n] = \emptyset$. Entonces basta tomar z_n y z'_n .

Tomamos $z_0 = z'_0 = x$. Si tenemos definidas z_k y z'_k , con $k < n$, por el punto anterior podemos tomar extensiones w_0, \dots, w_n de z_k de la misma altura con las k -ésimas componentes distintas dos a dos. Sea v' una extensión de z'_k de la misma altura. Entonces, existe un j tal que $w_{jk} \notin v'[n]$ y basta tomar $z_{k+1} = w_j$, $z'_{k+1} = v'$.

- *Existe $\alpha \leq \beta < \omega_1$ tal que B_β contiene infinitos elementos disjuntos dos a dos.*

Partimos de cualquier $z_0 \in B_\alpha$, lo extendemos a z_1, z'_1 disjuntos según el punto anterior. A su vez extendemos z_1 a z_2 y z'_2 disjuntos, y así sucesivamente. Llamamos β al supremo de las alturas de los z_n y extendemos todos los z'_n hasta la altura β . Dichas extensiones serán disjuntas dos a dos.

- Fijada una familia infinita $B^* \subset B_\beta$ de elementos disjuntos dos a dos, definimos B' como el conjunto de todas las extensiones en B de los elementos de B^* . Claramente cumple lo pedido. ■

Pasamos ya a ocuparnos del problema de definir un c.p.o. \mathbb{P}_T que especialice a un árbol de Aronszajn dado T . La forma natural de hacerlo sería tomar como condiciones las funciones f tales que existe un $\alpha < \omega_1$ tal que $f : \bigcup_{\delta < \alpha+1} \text{Niv}_\delta T \longrightarrow \mathbb{Q}$ estrictamente creciente. De este modo, si relativizamos toda la construcción a un modelo transitivo numerable M de ZFC y tomamos un filtro genérico G , la función $f_G = \bigcup_{s \in G} f$ cumple que $f : T \longrightarrow \mathbb{Q}$ estrictamente creciente.

Ahora bien, esto no significa que T sea un árbol de Aronszajn especial en $M[G]$, porque \aleph_1 se colapsa, luego T ya no es ni siquiera un \aleph_1 -árbol en $M[G]$.

En efecto, basta tener en cuenta que si $n \in \omega$ el conjunto D_n formado por las condiciones definidas hasta $\text{Niv}_\alpha(T)$ tales que $\bigwedge s \in \text{Niv}_\alpha(T) f(s) \geq n$ es denso, con lo que en $M[G]$ podemos tomar un $\alpha_n < \omega_1^M$ tal que

$$\bigwedge s \in \text{Niv}_{\alpha_n} T f_G(s) \geq n.$$

Si fuera $\omega_1^M = \omega_1^{M[G]}$, existiría un $\alpha < \omega_1^{M[G]}$ tal que $\bigwedge n \in \omega \alpha_n \leq \alpha$, y entonces un $s \in \text{Niv}_{\alpha+1} T$ cumpliría $\bigwedge n \in \omega f(s) \geq n$, lo cual es absurdo.

Esto nos obliga a imponer más condiciones en la definición de \mathbb{P}_T , y vamos a hacerlo de modo que sea propio. En todo lo que sigue T será un árbol de Aronszajn arbitrario, pero fijo.

Definición 11.14 Una *aproximación* es una función

$$f : \bigcup_{\delta < \alpha+1} \text{Niv}_\delta T \longrightarrow \mathbb{Q}$$

estrictamente creciente, donde $\alpha < \omega_1$ está únicamente determinado por f , por lo que lo representaremos por α_f y lo llamaremos *altura* de f .

Si $\gamma \geq \alpha_f$, diremos que una función finita $h : d \subset \text{Niv}_\gamma T \longrightarrow \mathbb{Q}$ *acota* a f si $\bigwedge x \in d f(x|_\alpha) < h(x)$, donde $x|_\alpha$ representa al elemento de $\text{Niv}_\alpha T$ situado bajo x .

Diremos que H es un *requisito* de altura $\gamma < \omega_1$ si existe un $n = n(H)$ tal que H es un conjunto de funciones $h : d \subset \text{Niv}_\gamma T \longrightarrow \mathbb{Q}$ con $|d| = n$.

Una aproximación f de altura α *cumple* un requisito H de altura α si para todo $t \subset \text{Niv}_\alpha T$ finito existe un $h \in H$ que acota a f y $t \cap Dh = \emptyset$.

Una *promesa* Γ es una sucesión $\{\Gamma_\gamma\}_{\beta \leq \gamma < \omega_1}$ (donde β está unívocamente determinado por Γ , así que lo representaremos por $\beta(\Gamma)$) tal que

- a) Cada Γ_γ es un conjunto numerable (no vacío) de requisitos de altura γ .
- b) Cada $H \in \Gamma_\gamma$ es *disperso*, es decir, para cada $t \subset \text{Niv}_\gamma T$ finito existe $h \in H$ tal que $t \cap \mathcal{D}h = \emptyset$.
- c) Si $\beta \leq \gamma < \delta < \omega_1$, para cada $h \in H \in \Gamma_\delta$, la aplicación $\mathcal{D}h \longrightarrow \text{Niv}_\gamma T$ dada por $s \mapsto s|_\gamma$ es inyectiva, con lo que podemos definir $h|_\gamma(s|_\gamma) = h(s)$, y se cumple que $\Gamma_\gamma = \{H|_\gamma \mid H \in \Gamma_\delta\}$, donde $H|_\gamma = \{h|_\gamma \mid h \in H\}$.

Diremos que una aproximación f *cumple* una promesa Γ si $\beta(\Gamma) \leq \alpha_f$ y f cumple cada requisito $H \in \Gamma_{\alpha_f}$.

Definimos $\mathbb{P} = \mathbb{P}_T$ como el conjunto de todos los pares (f, Γ) tales que f es una aproximación, Γ es una promesa y f cumple Γ .

Si $p = (f, \Gamma) \in \mathbb{P}$, escribiremos $f_p = f$, $\Gamma_p = \Gamma$, $\alpha_p = \alpha_{f_p}$, $\beta_{\bar{p}} = \beta(\Gamma_p)$.

Consideramos en \mathbb{P} el preorden dado por $q \leq p$ si y sólo si $f_p \subset f_q$ y para todo $\alpha_q \leq \gamma < \omega_1$ se cumple que $\Gamma_{p\gamma} \subset \Gamma_{q\gamma}$.

En principio, \mathbb{P} no tiene máximo elemento, pero podemos añadirle un nuevo conjunto $\mathbb{1}$ y extender el preorden de modo que éste pase a ser el máximo de \mathbb{P} .

Observemos que existen condiciones no triviales. Por ejemplo, basta tomar un ordinal α tal que $\text{Niv}_\alpha T$ sea infinito, elegir una aproximación f de altura α que esté acotada por un cierto $r \in \mathbb{Q}$ y, para cada $\alpha \leq \gamma < \omega_1$, definir el compromiso $H_\gamma = \{(s, r) \mid s \in \text{Niv}_\gamma T\}$ y finalmente tomar $\Gamma_\gamma = \{H_\gamma\}$.

Nota Si $p = (f, \Gamma) \in \mathbb{P}$ es una condición de altura α y g es una aproximación de altura α tal que $\bigwedge s \in \mathcal{D}f \ g(s) \leq f(s)$, entonces obviamente g cumple la promesa Γ .

Si $p_1 \leq p_0 < \mathbb{1}$ y llamamos $\alpha_i = \alpha_{p_i}$, $f_i = f_{p_i}$ y $j : \mathbb{Q}^+ \longrightarrow \mathbb{Q}^+$ es una función estrictamente creciente tal que $\bigwedge r \in \mathbb{Q}^+ j(r) \leq r$, para cada $x \in \text{Niv}_\alpha T$, con $\alpha_0 < \alpha \leq \alpha_1$, definimos

$$g(x) = f_0(x|_{\alpha_0}) + j(f_1(x) - f_0(x|_{\alpha_0})),$$

y si $x \in \bigcup_{\delta \leq \alpha_0} \text{Niv}_\alpha T$ definimos $g(x) = f_0(x)$. Entonces, en virtud de la observación precedente, la condición (g, Γ_{p_1}) es también una extensión de p_0 de altura α_1 . ■

Necesitamos algunos resultados sobre extensión de condiciones. El fundamental es el siguiente:

Teorema 11.15 Si $p \in \mathbb{P}$ y $\alpha_p < \alpha < \omega_1$, existe $q \in \mathbb{P}$ tal que $q \leq p$, $\alpha_q = \alpha$ y $\Gamma_q = \Gamma_p$. Más aún, si $h : d \subset \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ es una función finita que acota a p , podemos exigir que también acote a q .

DEMOSTRACIÓN: La segunda parte se sigue fácilmente de la primera. En efecto, si tenemos una extensión q , podemos modificarla como sigue. Fijamos $\delta \in \mathbb{Q}^+$ tal que $\bigwedge x \in \mathcal{D}h h(x) > f_p(x|_{\alpha_p}) + \delta$, tomamos $j : \mathbb{Q}^+ \rightarrow]0, \delta[$ estrictamente creciente tal que $\bigwedge r \in \mathbb{Q}^+ j(r) < r$. Ahora basta tomar la modificación q^* de q definida en la nota precedente. Así, si $x \in \text{Niv}_\alpha T$, tenemos que

$$f_{q^*}(x) = f_p(x|_{\alpha_p}) + j(f_q(x) - f_p(x|_{\alpha_p})) < f_p(x|_{\alpha_p}) + \delta < h(x),$$

luego h acota a q^* .

Para probar la primera parte razonamos por inducción sobre α . Si $\alpha = \alpha^* + 1$, por hipótesis de inducción podemos extender p a una condición de altura α^* , por lo que no perdemos generalidad si suponemos que $\alpha = \alpha_p + 1$. Se trata entonces de extender f_p hasta $\text{Niv}_{\alpha_p+1}T$ de modo que cumpla los requisitos de $\Gamma_{p,\alpha}$. Sabemos que, para cada $H \in \Gamma_{p,\alpha}$, se cumple que $H|_{\alpha_p} \in \Gamma_{p,\alpha_p}$, luego es satisfecho por f_p .

Existe una sucesión $\{h_m\}_{m \in \omega}$ de funciones finitas con dominios disjuntos dos a dos que acotan a f_p y que contiene infinitos elementos de cada $H \in \Gamma_{p,\alpha_p}$. En efecto, tomamos una enumeración $\{H_k\}_{k \in \omega}$ de $\Gamma_{p,\alpha}$ y fijamos una enumeración $\{k_m\}_{m \in \omega}$ de ω en la que cada número natural aparezca infinitas veces.

Supuestas construidas h_0, \dots, h_{m-1} , como f_p cumple el requisito $H_{k_m}|_{\alpha_p}$, podemos tomar $h_m \in H_{k_m}$ tal que $h_m|_{\alpha_p}$ acote a f_p y tenga dominio disjunto de $\bigcup_{i < m} \mathcal{D}h_i|_{\alpha_p}$, luego el dominio de h_m también será disjunto de $\bigcup_{i < m} \mathcal{D}h_i$.

Para cada $x \in \mathcal{D}h_m$ definimos

$$f_q(x) = \frac{f_p(x|_{\alpha_p}) + h_m(x)}{2},$$

mientras que si $x \in \text{Niv}_\alpha T \setminus \bigcup_{n < \omega} \mathcal{D}h_n$, definimos $f_q(x) = f_p(x|_{\alpha_p}) + 1$.

Así, la extensión f_q de f_p definida de este modo es estrictamente creciente y cumple claramente la promesa Γ_p , pues dado $H \in \Gamma_{p,\alpha}$ y $t \subset \text{Niv}_\alpha T$ finito, existe un $m < \omega$ tal que $H = H_{k_m}$ y el dominio de h_m es disjunto de t . Entonces $h_m \in H$ acota a f_q .

Supongamos ahora que α es un ordinal límite y sea $\{\alpha_m\}_{m < \omega}$ una sucesión cofinal creciente en α con $\alpha_0 = \alpha_p$. Vamos a definir una cadena de extensiones $\{p_m\}_{m < \omega}$, todas con la misma promesa Γ_p , de modo que $p_0 = p$ y la altura de p_m es α_m , así como una sucesión de funciones finitas $h_m : d_m \subset \text{Niv}_\alpha T \rightarrow \mathbb{Q}$ cada una de las cuales acota a la correspondiente f_{p_m} .

Como antes, tomamos una enumeración $\{H_k\}_{k < \omega}$ de $\Gamma_{p,\alpha}$ y fijamos una enumeración $\{k_m\}_{m \in \omega}$ de ω en la que cada número natural aparezca infinitas veces. Sea además $\{x_m\}_{m < \omega}$ una enumeración de $\text{Niv}_\alpha T$.

Supuesta definida p_m , como cumple el requisito $H_{k_m}|_{\alpha_m}$, podemos tomar una función $h \in H_{k_m}$ cuyo dominio sea disjunto del dominio de h_{m-1} (entendiendo que esto se cumple trivialmente si $m = 0$) y que acote a f_{p_m} . Claramente podemos modificar h para obtener otra función h' con el mismo dominio, que siga acotando a f_{p_m} y tal que $\bigwedge x \in \mathcal{D}h' h'(x) < h(x)$.

Definimos $h_m = h_{m-1} \cup h'$, que claramente acota a f_{p_m} , y si $x_m \notin \mathcal{D}h_m$, lo añadimos asignándole una imagen tal que $h_m(x_m) > f_{p_m}(x_m|_{\alpha_m})$. De este modo h_m sigue acotando a f_{p_m} y, por la hipótesis de inducción, existe $p_{m+1} \in \mathbb{P}$ que extiende a p_m con altura α_{m+1} , con la misma promesa y acotada por h_m .

Esta construcción garantiza que $h^* = \bigcup_{m \in \omega} h_m : \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ y que, para cada $k < \omega$ y cada $m \geq k$, se cumple que $x_k \in \mathcal{D}h_m$, luego

$$f_{p_m}(x_k|_{\alpha_m}) < h_m(x_k) = h^*(x_k).$$

Esto hace que $f_q = \bigcup_{m \in \omega} f_{p_m} \cup h^*$ sea una aproximación, y además cumple cada requisito de $\Gamma_{p,\alpha}$, pues, dado cualquier conjunto finito $t \subset \text{Niv}_\alpha T$ y $H \in \Gamma_{p,\alpha}$, existe un $m < \omega$ tal que $H = H_{k_m}$, $t \subset \mathcal{D}h_{m-1}$, y entonces, por la construcción, existe un $h \in H$ tal que $h' \subset h_m \subset h^*$ (con lo que h acota a f_q) y cuyo dominio es disjunto de t . Por lo tanto, $q = (f_q, \Gamma_p) \in \mathbb{P}$ y $\alpha_q = \alpha$. ■

A su vez, como consecuencia demostramos un resultado de adición de requisitos a la promesa de una condición:

Teorema 11.16 *Sea $p \in \mathbb{P}$ una condición, sea $\alpha = \alpha_p$ y sea Δ una promesa tal que $\alpha < \beta = \beta(\Delta)$. Si existe una aplicación finita $g : d \subset \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ que acota f_p y*

$$\bigwedge \gamma \in \omega_1 \setminus \beta \bigwedge H \in \Delta_\gamma \bigwedge h \in H \quad h|_\alpha = g,$$

entonces existe $q \in \mathbb{P}$ tal que $q \leq p$, $\alpha_q = \beta$ y $\bigwedge \gamma \in \omega_1 \setminus \beta \Delta_\gamma \subset \Gamma_{q,\gamma}$.

DEMOSTRACIÓN: Fijemos un $\delta \in \mathbb{Q}^+$ tal que $\bigwedge x \in \mathcal{D}g \quad g(x) > f_p(x) + \delta$. Por el teorema anterior existe $q' \in \mathbb{P}$ tal que $q' \leq p$ y $\alpha_{q'} = \beta$. Fijamos una aplicación $j : \mathbb{Q}^+ \longrightarrow]0, \delta[$ estrictamente creciente y tal que $\bigwedge r \in \mathbb{Q}^+ \quad j(r) < r$. Entonces, según hemos observado en la nota tras la definición 11.14, la extensión f^* de f_p de altura β determinada por

$$f^*(x) = f_p(x|_\alpha) + j(f_{q'}(x) - f_p(x|_\alpha)).$$

cumple que $(f^*, \Gamma_p) \in \mathbb{P}$ es una extensión de p . Además, si $h \in H \in \Delta_\beta$ y $x \in \mathcal{D}h$, tenemos que $h|_\alpha = g$, luego

$$f^*(x) < f_p(x|_\alpha) + \delta < g(x|_\alpha) = h|_\alpha(x|_\alpha) = h(x)$$

luego f^* cumple el requisito H . Como también cumple los requisitos de $\Gamma_{p,\beta}$, podemos formar una condición q dada por $f_q = f^*$ y la promesa Γ_q determinada por $\Gamma_{q,\gamma} = \Gamma_{p,\gamma} \cup \Delta_\gamma$ para $\beta \leq \gamma < \omega_1$. Es inmediato que $q \leq p$. ■

Para demostrar que \mathbb{P} es propio nos apoyaremos en el resultado siguiente, en cuya prueba se pone de manifiesto el papel que representan las promesas:

Teorema 11.17 *Sea κ un cardinal regular no numerable, sea $N \prec H(\kappa)$ numerable tal que $T, \mathbb{P} \in N$, sea $p \in N \cap \mathbb{P}$, $\alpha = \omega_1 \cap N$ y $h : d \subset \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ una función finita que acote a f_p . Sea $D \in N$ un abierto denso en \mathbb{P} . Entonces existe $r \in D \cap N$ tal que $r \leq p$ y f_r está acotada por h .*

DEMOSTRACIÓN: Vamos a probar algo ligeramente más general. Supongamos que d es un conjunto finito de ramas de altura α en T y vamos a fijar una enumeración $d = \{d_i\}_{i < n}$. Cuando decimos que h acota a f_p queremos decir que si $d_i|_{\alpha_p}$ es el elemento de altura α_p en la rama d_i , entonces $f_p(d_i|_{\alpha_p}) < h(d_i)$. El enunciado se obtiene como caso particular cuando aplicamos esta versión a las ramas $\{u \in T \mid u < s\}$, para cada $s \in d$.

Supongamos que no existe tal r . Podemos suponer que los $d_i|_{\alpha_p}$ son distintos dos a dos, pues en caso contrario podemos tomar un ordinal $\alpha' < \alpha_p$ tal que los $d_i|_{\alpha'}$ sean distintos dos a dos y cambiar p por una extensión de p de altura α' (que podemos tomar en N). Si dicha extensión pudiera extenderse hasta un r en las condiciones del enunciado, también podría extenderse p .

Llamemos $g_0 = h|_{\alpha_p}$. Diremos que una función finita $g : d_g \subset \text{Niv}_\gamma T \rightarrow \mathbb{Q}$ es mala si $\alpha_p \leq \gamma < \omega_1$, $|d_g| = n$, existe $g|_{\alpha_p} = g_0$ (es decir, las restricciones de los elementos de d_g son distintas dos a dos) y ninguna condición $r \in D$, $r \leq p$, $\alpha_r \leq \gamma$ está acotada por g .

En particular, si $\alpha_p \leq \gamma < \alpha$, se cumple que $h|_\gamma$ es mala^N, pues si existiera $r \in D \cap N$ con $r \leq p$, $\alpha_r \leq \gamma$ y acotada por $h|_\gamma$, entonces también lo estaría por h y cumpliría el teorema.

Esto implica que en N y, por lo tanto, en $H(\kappa)$, existe una cantidad no numerable de funciones malas. En efecto, si el conjunto de las aplicaciones malas fuera numerable, existiría una cota $\gamma \in N$ de sus alturas, $\gamma < \omega_1$, y entonces $\alpha_p \leq \gamma < \alpha$, con lo que $h|_\gamma$ no sería mala^N, contradicción.

Observemos también que si $g : d_g \subset \text{Niv}_\gamma T \rightarrow \mathbb{Q}$ es mala y $\alpha_p \leq \gamma' < \gamma$, entonces $g|_{\gamma'}$ también es mala.

Llamamos $B \subset T^n$ al conjunto de los dominios de las funciones malas (vistos como n -tuplas). Así $B_\gamma \neq \emptyset$ para todo $\alpha_p \leq \gamma < \omega_1$ (luego es no numerable) y tiene la propiedad de que si $x \in B$ y $x' \in \text{Niv}_\gamma T$ con $\alpha_p \leq \gamma < \omega_1$ cumple $x' \leq x$ entonces $x' \in B_\gamma$.

Podemos aplicar el teorema 11.13, que nos da un conjunto $B^0 \subset B$ y un ordinal $\alpha_p \leq \beta < \omega_1$ tales que si $\beta \leq \gamma < \gamma' < \omega_1$ entonces $B_\gamma^0 = B_{\gamma'}^0|_\gamma$ y B_β^0 es disperso (todo conjunto finito en $\text{Niv}_\beta T$ es disjunto de un elemento de B_β^0). Más aún, como $B \in N$ y la propiedad con la que hemos escogido B_0 está definida en términos de parámetros en N , podemos exigir que $B_0 \in N$.

Para cada $\beta \leq \gamma < \omega_1$, definimos el requisito

$$H_\gamma = \{g \mid g \text{ es mala} \wedge \mathcal{D}g \in B_\gamma^0\}.$$

Claramente $\Delta_\gamma = \{H_\gamma\}$ define una promesa, y todas las funciones de cada H_γ extienden a g_0 , que acota a f_p . Por el teorema anterior existe $q \in \mathbb{P}$ de altura β tal que $q \leq p$ y $\bigwedge \gamma \in \omega_1 \setminus \beta \ H_\gamma \in \Gamma_{q,\gamma}$. Se cumple que $\Delta \in N$, lo que a su vez implica que podemos tomar $q \in N$.

Finalmente tomamos $r \in D$ tal que $r \leq q$. Claramente podemos exigir que $r \in N$. Como f_r satisface Γ_{q,α_r} , en particular satisface H_{α_r} , luego existe $g \in H_{\alpha_r}$ que acota a f_r , en contradicción con que g tiene que ser mala. ■

Teorema 11.18 *Existe un sistema de completitud numerablemente completo \mathbb{D} tal que \mathbb{P} es \mathbb{D} -completo.*

DEMOSTRACIÓN: Tomemos un cardinal regular κ suficientemente grande, sea $N \prec H(\kappa)$ un submodelo elemental numerable de manera que $\mathbb{P} \in N$ y sea $p_0 \in \mathbb{P} \cap N$. Sea $\phi : N \longrightarrow \bar{N}$ el colapso transitivo de N , sea $\bar{\mathbb{P}} = \phi(\mathbb{P})$ y $\bar{p}_0 = \phi(p_0)$. Sea $\alpha = \omega_1 \cap N$, de modo que $\phi(\alpha) = \omega_1^{\bar{N}}$.

Observemos que $T \in N$, pues puede reconstruirse a partir de \mathbb{P} , y si $\delta < \alpha$, entonces $\text{Niv}_\delta T \in N$ y, al ser numerable, $\text{Niv}_\delta T \subset N$. Es claro entonces que ϕ se restringe a un isomorfismo

$$\phi : T_\alpha = \bigcup_{\delta < \alpha} \text{Niv}_\delta T \longrightarrow \bar{T} = \phi(T).$$

Así \bar{T} es un árbol de Aronszajn $^{\bar{N}}$ y $\bar{\mathbb{P}}$ es (en \bar{N}) el c.p.o. asociado a \bar{T} . Observemos que \bar{T} tiene altura α , por lo que no existe $\text{Niv}_\alpha \bar{T}$. Sin embargo, vamos a ver que podemos traspasar a \bar{N} mediante ϕ toda la información relevante sobre $\text{Niv}_\alpha T$.

Para ello observamos que cada $s \in \text{Niv}_\alpha T$ determina una rama

$$R_s = \{s|_\delta \mid \delta < \alpha\}$$

cofinal en T_α , que a su vez determina una rama $\bar{s} = \phi[R_s] \subset \bar{N}$ cofinal en \bar{T} . No puede suceder que $\bar{s} \in \bar{N}$, porque entonces \bar{T} no sería un árbol de Aronszajn en \bar{N} . Podemos pensar en \bar{s} como la “mejor traducción posible” de s a \bar{N} . Si $\delta < \alpha$, llamaremos $\bar{s}|_\delta = \phi(s|_\delta)$, que es el elemento de altura δ en la rama \bar{s} .

Sea $\{s_n\}_{n \in \omega}$ una enumeración de $\text{Niv}_\alpha T$ y sea $\{\bar{s}_n\}_{n \in \omega}$ dada por $\bar{s}_n = \overline{s_n}$.

Si $p \in \mathbb{P} \cap N$, $H \in \Gamma_{p,\alpha}$ y $h \in H$, entonces $h : d \longrightarrow \mathbb{Q}$, donde $d \subset \text{Niv}_\alpha T$ es finito. Definimos $\bar{h} : \bar{d} \longrightarrow \mathbb{Q}$, donde $\bar{d} = \{n \in \omega \mid s_n \in d\}$ y $\bar{h}(n) = h(s_n)$. Así \bar{h} “codifica” h . Definimos $\bar{H} = \{\bar{h} \mid h \in H\}$ y $\bar{\Gamma}_{\bar{p}} = \{\bar{H} \mid H \in \Gamma_{p,\alpha}\}$.

Claramente se cumplen las propiedades siguientes, a las que nos referiremos con (*):

- $\bar{s} = \{\bar{s}_n\}_{n \in \omega}$ es una sucesión de caminos (ramas cofinales) en \bar{T} .
- $\bar{\Gamma}$ es una función definida en $\bar{\mathbb{P}}$ que asocia a cada $\bar{p} \in \bar{\mathbb{P}}$ un conjunto numerable $\bar{\Gamma}_{\bar{p}}$ de “requisitos” \bar{H} , entendidos como conjuntos de funciones $\bar{h} : \bar{d} \subset \omega \longrightarrow \mathbb{Q}$, con \bar{d} finito.
- Los dominios de las funciones de \bar{H} forman un conjunto disperso, en el sentido de que para todo conjunto finito $t \subset \omega$ existe $\bar{h} \in \bar{H}$ tal que $t \cap \mathcal{D}\bar{h} = \emptyset$.

- Si $\beta_{\bar{q}} \leq \delta < \alpha$, entonces $\Gamma_{\bar{p}, \delta} = \{\bar{H}|_\delta \mid \bar{H} \in \bar{\Gamma}_{\bar{p}}\}$, donde

$$\bar{H}|_\delta = \{\bar{h}_\delta \mid \bar{h} \in \bar{H}\},$$

donde a su vez, si $\mathcal{D}\bar{h} = \{n_1, \dots, n_k\}$, entonces $\mathcal{D}\bar{h}_\delta = \{\bar{s}_{n_1}|_\delta, \dots, \bar{s}_{n_k}|_\delta\}$, con todos los \bar{s}_{n_i} distintos dos a dos, y $\bar{h}_\delta(\bar{s}_{n_i}|_\delta) = \bar{h}(n_i)$.

- Si $\bar{p} \leq \bar{p}'$, entonces $\bar{\Gamma}_{\bar{p}'} \subset \bar{\Gamma}_{\bar{p}}$.

También contamos con que \bar{N} , $\bar{\mathbb{P}}$ y \bar{T} cumplen la traducción a través de ϕ del teorema anterior (no de su enunciado, sino del hecho más general que hemos probado, precisamente para poder aplicarlo aquí), es decir:

(**) *Si $\bar{p} \in \bar{\mathbb{P}}$, $\bar{D} \in \bar{N}$ es denso en $\bar{\mathbb{P}}$ y $\bar{h} : \bar{d} \longrightarrow \mathbb{Q}$ es una aplicación definida en un conjunto finito \bar{d} de caminos en \bar{T} (que necesariamente no están en \bar{N}) que acota a $f_{\bar{p}}$ (en el sentido de que, para todo $\bar{s} \in \bar{d}$, se cumple que $f_{\bar{p}}(\bar{s}|_{\alpha_{\bar{p}}}) < \bar{h}(\bar{s})$), entonces existe $\bar{r} \in \bar{D}$ tal que $\bar{r} \leq \bar{p}$ y $f_{\bar{r}}$ está acotada por \bar{h} .*

Más aún, en la prueba del teorema se ve que podemos tomar \bar{r} de altura arbitrariamente grande (menor que α). Concretamente, esto se debe a que en la parte final de la prueba podemos elegir $\beta \in N$ arbitrariamente grande.

En esta situación tenemos que definir $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ de modo que la definición valga para cualquier modelo transitivo numerable \bar{N} de ZFC–AP, cualquier c.p.o. $\bar{\mathbb{P}} \in \bar{N}$ y cualquier $\bar{p}_0 \in \bar{\mathbb{P}}$, y proporcione una familia no vacía de conjuntos no vacíos de filtros $\bar{\mathbb{P}}$ -genéricos sobre \bar{N} que contienen a \bar{p}_0 , de tal manera que, en el caso particular en que \bar{N} , $\bar{\mathbb{P}}$ y \bar{p}_0 sean los que hemos descrito, entonces las antiimágenes por ϕ de los filtros de alguno de los elementos de $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ estén acotadas inferiormente en \mathbb{P} . Además toda intersección numerable de elementos de $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ debe ser no vacía.

Para definir $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ distinguimos dos casos:

- $\bar{\mathbb{P}}$ es (en \bar{N}) el c.p.o. asociado a un árbol de Aronszajn \bar{T} , se cumple la propiedad (**) y existe al menos un par $(\bar{s}, \bar{\Gamma})$ que cumple (*).
- Cualquier otro caso.

En el caso b) definimos $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ como el conjunto cuyo único elemento es el conjunto de todos los filtros $\bar{\mathbb{P}}$ -genéricos sobre \bar{N} que contienen a \bar{p}_0 . A partir de aquí nos centramos en el caso a). Para cada par $(\bar{s}, \bar{\Gamma})$ que cumpla (*) vamos a definir un conjunto $X_{\bar{s}, \bar{\Gamma}}$ de filtros $\bar{\mathbb{P}}$ -genéricos sobre \bar{N} que contienen a \bar{p}_0 , y así definiremos $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ como el conjunto de todos los conjuntos $X_{\bar{s}, \bar{\Gamma}}$.

De este modo, en el caso en que \bar{N} sea el colapso de un modelo N en las condiciones iniciales de la prueba, entre los elementos de $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ figurará en particular el construido a partir de la auténtica sucesión \bar{s} que codifica a través de la función colapsante ϕ el nivel α -ésimo de \mathbb{P} y la auténtica función

$\bar{\Gamma}$ que codifica las promesas $\bar{\Gamma}_{p,\alpha}$, y será dicho conjunto el que probará la \mathbb{D} -completitud de \mathbb{P} , es decir, el que cumplirá que las antiimágenes por ϕ de sus filtros estarán acotadas inferiormente en \mathbb{P} .

Fijamos una sucesión $\{\alpha_m\}_{m \in \omega}$ cofinal creciente en α con $\alpha_0 = \alpha_{\bar{p}_0}$ y una enumeración $\{\bar{D}_m\}_{m \in \omega}$ de todos los abiertos densos en $\bar{\mathbb{P}}$ que están en \bar{N} . Fijamos una biyección $\bar{j} : \omega \rightarrow \omega^3$ y definimos $j : \omega \rightarrow \omega^2$ mediante

$$j(m) = \begin{cases} (n, k) & \text{si } \bar{j}(m) = (n, k, i) \wedge n \leq m, \\ (0, 0) & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

De este modo $j(m) = (n, k) \rightarrow n \leq m$ y cada para (n, k) aparece infinitas veces en la sucesión $\{j(m)\}_{m \in \omega}$. Vamos a definir una sucesión decreciente de condiciones $\{\bar{p}_m\}_{m \in \omega}$ en $\bar{\mathbb{P}}$ de alturas $\alpha'_m \geq \alpha_m$, una sucesión $\{\bar{h}_m\}_{m \in \omega}$ de funciones finitas $\bar{h}_m : \bar{d}_m \subset \omega \rightarrow \mathbb{Q}$, así como enumeraciones $\{\bar{H}_k^m\}_{k \in \omega}$ de los conjuntos $\bar{\Gamma}_{\bar{p}_m}$.

Partimos del \bar{p}_0 dado y fijamos una enumeración $\{\bar{H}_k^0\}_{k \in \omega}$ de $\bar{\Gamma}_{\bar{p}_0}$. Supongamos definidos $\bar{p}_0, \dots, \bar{p}_m$ (con las enumeraciones correspondientes de los $\bar{\Gamma}_{\bar{p}_i}$) y $\bar{h}_0, \dots, \bar{h}_{m-1}$. Calculamos $j(m) = (n, k)$. Como $n \leq m$, está definido el requisito $\bar{H}_k^n \in \bar{\Gamma}_{\bar{p}_n} \subset \bar{\Gamma}_{\bar{p}_m}$ y \bar{p}_m cumple el requisito $\bar{H}_k^n|_{\alpha'_m}$, luego podemos tomar $\bar{h} \in \bar{H}_k^n$ con dominio disjunto del dominio de \bar{h}_{m-1} tal que $\bar{h}|_{\alpha'_m}$ acote a $f_{\bar{p}_m}$.

Así, si $k \in \bar{d}$, se cumple que $f_{\bar{p}_m}(s_k|_{\alpha'_m}) < \bar{h}(k)$. Podemos modificar \bar{h} hasta una función \bar{h}' con el mismo dominio pero que cumpla $\bigwedge k \in \mathcal{D}\bar{h}' \bar{h}'(k) < \bar{h}(k)$. Definimos $\bar{h}_m = \bar{h}_{m-1} \cup \bar{h}'$ y, si $m \notin \mathcal{D}\bar{h}_m$, extendemos \bar{h}_m para que contenga a m de modo que \bar{h}_m siga acotando a $f_{\bar{p}_m}$.

Ahora usamos la propiedad (**) para obtener $\bar{p}_{m+1} \in \bar{D}_m$ acotada por \bar{h}_m tal que $\bar{p}_{m+1} \leq \bar{p}_m$. Además, según hemos observado tras (**), podemos tomar \bar{p}_{m+1} de altura arbitrariamente grande, de modo que podemos exigir que $\alpha'_{m+1} = \alpha_{p_{m+1}} \geq \alpha_{m+1}$. Ahora podemos fijar la enumeración $\{\bar{H}_k^{m+1}\}_{k \in \omega}$ de $\bar{\Gamma}_{\bar{p}_{m+1}}$ y continuar la construcción.

Ahora definimos $X_{\bar{s}, \bar{\Gamma}}$ como el conjunto de todos los filtros $\bar{\mathbb{P}}$ -genéricos sobre \bar{N} generados por una sucesión decreciente de condiciones $\{\bar{p}_n\}_{n \in \omega}$ de alturas cofinales en α que empieza en el \bar{p}_0 dado y tal que exista una función $\bar{h}^* : \omega \rightarrow \mathbb{Q}$ que cumpla las propiedades siguientes:

- a) $\bigwedge km \in \omega f_{\bar{p}_m}(\bar{s}_k|_{\alpha'_m}) < \bar{h}^*(k)$,
- b) Si $\bar{H} \in \bigcup_{m \in \omega} \bar{\Gamma}_{\bar{p}_m}$ y $\bar{t} \subset \omega$ es finito, existe $\bar{h} \in \bar{H}$ tal que $\mathcal{D}\bar{h} \cap \bar{t} = \emptyset$ y $\bigwedge k \in \mathcal{D}\bar{h} \bar{h}^*(k) < \bar{h}(k)$.

Observamos que $X_{\bar{s}, \bar{\Gamma}} \neq \emptyset$, pues el filtro generado por la sucesión $\{\bar{p}_m\}_{m \in \omega}$ que hemos construido es obviamente \mathbb{P} -genérico sobre \bar{N} , y además cumple estas propiedades con $\bar{h}^* = \bigcup_{m \in \omega} \bar{h}_m : \omega \rightarrow \mathbb{Q}$. En efecto:

- a) Para cada $k \in \omega$ y cada $m \geq k$, se cumple que $k \in \mathcal{D}\bar{h}_m$, luego

$$f_{\bar{p}_m}(s_k|_{\alpha'_m}) < \bar{h}_m(k) = \bar{h}^*(k).$$

Y si $m < k$ entonces igualmente $f_{\bar{p}_m}(s_k|_{\alpha'_m}) = f_{\bar{p}_k}(s_k|_{\alpha'_m}) < f_{\bar{p}_k}(s_k|_{\alpha'_k}) < \bar{h}^*(k)$.

b) Si $\bar{H} \in \bigcup_{m \in \omega} \bar{\Gamma}_{\bar{p}_m}$, existen $n, k \in \omega$ tales que $\bar{H} = \bar{H}_k^n$ y existen infinitos valores de m tales que $j(m) = (n, k)$. Para alguno de estos m se cumplirá que $\bar{t} \subset \mathcal{D}\bar{h}_{m-1}$, con lo que, por construcción, existe un $\bar{h} \in \bar{H} = \bar{H}_k^n$ tal que $\bar{h}' \subset \bar{h}_m \subset \bar{h}^*$ (luego $\bigwedge k \in \mathcal{D}\bar{h} \bar{h}^*(k) < \bar{h}(k)$) y su dominio es disjunto con \bar{t} .

Esto termina la definición de $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$. Ahora observamos que, en las condiciones del inicio de la demostración, donde hemos partido de una terna (N, \mathbb{P}, p_0) y la hemos colapsado a $(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$, si tomamos concretamente el $X_{\bar{s}, \bar{\Gamma}}$ determinado por el par $(\bar{s}, \bar{\Gamma})$ que hemos construido, si \bar{G} es el filtro generado por una sucesión $\{\bar{p}_m\}_{m \in \omega}$ en las condiciones indicadas, entonces el filtro G en \mathbb{P} generado por $\phi^{-1}[\bar{G}]$ está, de hecho, generado por la sucesión $\{p_m\}_{m \in \omega}$ en $\mathbb{P} \cap N$ formada por las antiimágenes por ϕ de las condiciones \bar{p}_m .

Se trata de una sucesión decreciente de condiciones de alturas cofinales en α , por lo que si llamamos $h^* : \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ a la función dada por $h^*(s_n) = \bar{h}^*(n)$, la propiedad a) se traduce en que $\bigwedge m \in \omega f_{\bar{p}_m}(s_k|_{\alpha'_m}) < h^*(s_k)$, por lo que $f_q = \bigcup_{m \in \omega} f_{p_m} \cup h^*$ es una aproximación de altura α . Para cada $\alpha \leq \gamma < \omega_1$, podemos definir

$$\Gamma_{q, \gamma} = \bigcup_{m \in \omega} \Gamma_{p_m, \gamma},$$

Es claro entonces que Γ_q es una promesa, y la propiedad b) se traduce en que f_q la cumple, pues si $H \in \Gamma_{q, \alpha}$ y $t \subset \text{Niv}_\alpha T$ finito, existe un $m \in \omega$ tal que $H \in \Gamma_{p_m, \alpha}$, luego $\bar{H} \in \bar{\Gamma}_{\bar{p}_m}$. Además podemos definir $\bar{t} = \{k \in \omega \mid s_k \in t\}$, con lo que por b) existe un $\bar{h} \in \bar{H}$ con dominio disjunto con \bar{t} tal que $\bar{h}^* < \bar{h}$, luego $h \in H$ acota a h^* , luego a f_q .

Por consiguiente (f_q, Γ_q) es una condición $q \in \mathbb{P}$ que claramente cumple $q \leq p_m$, para todo $m \in \omega$, luego q acota inferiormente a G .

Esto prueba que \mathbb{P} es \mathbb{D} -completo. Para terminar sólo falta ver que \mathbb{D} es numerablemente cerrado. La propiedad se cumple trivialmente para ternas $(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ en el caso trivial de la definición de \mathbb{D} . En el caso no trivial tenemos que considerar una familia numerable de pares $\{(\bar{s}^k, \bar{\Gamma}^k)\}_{k \in \omega}$ y demostrar que existe un filtro en $\bigcap_{k \in \omega} X_{(\bar{s}^k, \bar{\Gamma}^k)}$.

Para ello fijamos una biyección $\pi : \omega \longrightarrow \omega \times \omega$, definimos $\bar{s}_n = \bar{s}_{\pi_2(n)}^{\pi_1(n)}$, con lo que $\{\bar{s}_n\}_{n \in \omega}$ incluye los caminos de todas las sucesiones \bar{s}^k . Si $\bar{h} \in \bar{H} \in \bar{\Gamma}_{\bar{p}}^k$, definimos \bar{h}'_k como la función definida sobre $\bar{d}'_k = \{\pi^{-1}(k, m) \mid m \in \mathcal{D}\bar{h}\}$ de modo que $\bar{h}'_k(n) = \bar{h}(\pi_2(n))$. Así definimos $\bar{H}'_k = \{\bar{h}'_k \mid \bar{h} \in \bar{H}\}$ y

$$\bar{\Gamma}'_{\bar{p}}^k = \{\bar{H}'_k \mid \bar{H} \in \bar{\Gamma}_{\bar{p}}^k\}, \quad \bar{\Gamma}_{\bar{p}} = \bigcup_{k \in \omega} \bar{\Gamma}'_{\bar{p}}^k.$$

Es fácil comprobar que $(\bar{s}, \bar{\Gamma})$ así definidos cumplen (**), por lo que determinan un conjunto $X_{(\bar{s}, \bar{\Gamma})}$. Vamos a probar que está contenido en $\bigcap_{k \in \omega} X_{(\bar{s}^k, \bar{\Gamma}^k)}$.

En efecto, si $\{\bar{p}_m\}_{m \in \omega}$ es una sucesión que genera un elemento de $X_{(\bar{s}, \bar{\Gamma})}$ (es decir, que cumple a) y b) para una cierta función $\bar{h}^* : \omega \longrightarrow \mathbb{Q}$), fijamos un

$k \in \omega$ y definimos la función $\bar{h}_k^* : \omega \longrightarrow \mathbb{Q}$ mediante $\bar{h}_k^*(n) = \bar{h}^*(\pi^{-1}(k, n))$. Así, si $n, m \in \omega$, se cumple que

$$f_{\bar{p}_m}(\bar{s}_n^k|_{\alpha'_m}) = f_{\bar{p}_m}(\bar{s}_{\pi^{-1}(k, n)}|_{\alpha'_m}) < \bar{h}^*(\pi^{-1}(k, n)) = \bar{h}_k^*(n),$$

luego $\{\bar{p}_m\}_{m \in \omega}$ y \bar{h}_k^* cumplen la propiedad a) para $(\bar{s}^k, \bar{\Gamma}^k)$.

Similarmente, si $\bar{H} \in \bigcup_{m \in \omega} \bar{\Gamma}_{\bar{p}_m}^k$ y $\bar{t} \subset \omega$ es finito, entonces $\bar{H}'_k \in \bigcup_{m \in \omega} \bar{\Gamma}_{\bar{p}_m}$, y podemos considerar $\bar{t}' = \{\pi(k, n) \mid n \in \bar{t}\}$, con lo que existe $\bar{h}'_k \in \bar{H}'_k$ cuyo dominio es disjunto de \bar{t}' y $\bigwedge n \in \mathcal{D}\bar{h}'_k \bar{h}^*(n) < \bar{h}'_k(n)$, pero entonces $\bar{h} \in \bar{H}$ tiene dominio disjunto con \bar{t} y

$$\bigwedge n \in \mathcal{D}\bar{h} \bar{h}^*(\pi^{-1}(k, n)) < \bar{h}'_k(\pi^{-1}(k, n)),$$

que a su vez equivale a que $\bigwedge n \in \mathcal{D}\bar{h} \bar{h}_k^*(n) < \bar{h}(n)$. Esto prueba que $\{\bar{p}_m\}_{m \in \omega}$ y \bar{h}_k^* cumplen también la propiedad b) para $(\bar{s}^k, \bar{\Gamma}^k)$, luego el filtro generado por la sucesión está en $X_{(\bar{s}^k, \bar{\Gamma}^k)}$. ■

Observaciones Vamos a necesitar algunas consecuencias de la demostración del teorema anterior:

- El c.p.o. \mathbb{P} no es separativo, pero si llamamos $\hat{\mathbb{P}}$ al c.p.o. separativo construido en la prueba de 4.57 a partir de \mathbb{P} , sucede que el teorema anterior vale igualmente para $\hat{\mathbb{P}}$.

Observemos en primer lugar que $\hat{\mathbb{P}}$ determina a \mathbb{P} como conjunto, el cual determina a T como árbol, el cual determina a \mathbb{P} como c.p.o., por lo que $\hat{\mathbb{P}}$ determina a \mathbb{P} . Esto nos permite modificar la definición de \mathbb{D} distinguiendo un tercer caso, a saber, que $\bar{\mathbb{P}}$ sea de la forma $\hat{\mathbb{P}}'$, para un (único) c.p.o. $\bar{\mathbb{P}}'$ asociado a un (único) árbol de Aronszajn T . En tal caso, para cada $\bar{p}_0 \in \bar{\mathbb{P}}$ elegimos un $\bar{p}'_0 \in \bar{p}_0$ y definimos

$$\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0) = \{\hat{X} \mid X \in \mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}', \bar{p}'_0)\},$$

donde a su vez \hat{X} está formado por los filtros en $\bar{\mathbb{P}}$ generados por las imágenes de los filtros de X . Es claro que \mathbb{D} sigue siendo un sistema de completitud numéricamente completo, y se cumple que $\hat{\mathbb{P}}$ es también \mathbb{D} -completo (y separativo).

En efecto, si $\hat{\mathbb{P}} \in N$, $\hat{p}_0 \in \hat{\mathbb{P}} \cap N$ según la definición de \mathbb{D} -completitud y $(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ resulta de colapsar $(N, \hat{\mathbb{P}}, \hat{p}_0)$, tenemos que también $\mathbb{P} \in N$, luego podemos considerar su colapso transitivo $\bar{\mathbb{P}}'$, de modo que $\bar{\mathbb{P}} = \hat{\mathbb{P}}'$ (y podemos elegir $p_0 \in \mathbb{P}$ de modo que su colapso sea la condición $\bar{p}'_0 \in \bar{p}_0$ elegida para la definición de \mathbb{D}). Por el teorema anterior $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}', \bar{p}'_0)$ contiene un conjunto X tal que las antiimágenes de sus filtros están acotadas inferiormente en \mathbb{P} , y es claro entonces que las antiimágenes de los filtros de \hat{X} también están acotadas en $\hat{\mathbb{P}}$ (por la imagen de la cota).

- Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC, sea $M[G]$ una extensión genérica de M respecto de un c.p.o. que conserva $\mathcal{P}\omega$, sea $T \in M[G]$ un árbol de Aronszajn $M[G]$ y sea $\mathbb{P} \in M[G]$ el c.p.o. asociado. Entonces, el sistema de completitud $\mathbb{D} \in M[G]$ construido en $M[G]$ según el teorema anterior (y la modificación que hemos definido en la observación precedente) coincide con el definido en M , es decir, $\mathbb{D}^M = \mathbb{D}^{M[G]}$.

En efecto, si $\bar{N} \in M[G]$ es un modelo transitivo numerable de ZFC–AP, entonces $\bar{N} \in H(\aleph_1)^{M[G]} = H(\aleph_1)^M \subset M$, luego el dominio de \mathbb{D} está en M . Dada una terna $(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)$ en dicho dominio que se encuentre en el caso trivial, es claro que todo filtro $\bar{\mathbb{P}}$ -genérico sobre \bar{N} que esté en $M[G]$ está de hecho en M (pues $\bar{\mathbb{P}}$ es numerable M), de donde se sigue que $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)^{M[G]} = \mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)^M$. En el caso no trivial en que $\bar{\mathbb{P}}$ es el c.p.o. asociado a un árbol de Aronszajn, la situación es similar: una comprobación rutinaria muestra que todo par $(\bar{s}, \bar{\Gamma}) \in M[G]$ que define un conjunto $X_{(\bar{s}, \bar{\Gamma})}$ está de hecho en M y la definición de $X_{(\bar{s}, \bar{\Gamma})}$ es absoluta para $M - M[G]$, con lo que igualmente llegamos a que $\mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)^{M[G]} = \mathbb{D}(\bar{N}, \bar{\mathbb{P}}, \bar{p}_0)^M$.

Por último, si $\bar{\mathbb{P}} = \hat{\mathbb{P}}'$, para un cierto c.p.o. $\hat{\mathbb{P}}'$ asociado a un árbol de Aronszajn, llegamos a la misma conclusión sin más precaución que tomar en M la función con la que elegimos el representante de cada $\bar{p}_0 \in \bar{\mathbb{P}}$.

Las dos observaciones precedentes nos permitirán más adelante aplicar el teorema 10.34 a iteraciones de (c.p.o.s separativos determinados por) c.p.o.s asociados a árboles de Aronszajn. ■

En particular el teorema anterior implica que el c.p.o. \mathbb{P} asociado a un árbol de Aronszajn T es propio.

Un buen ejercicio para el lector sería particularizar la demostración del teorema anterior para probar esto directamente, pues para ello no es necesario considerar colapsos transitivos ni trabajar con pares arbitrarios $(\bar{s}, \bar{\Gamma})$, sino que podemos trabajar directamente con una enumeración $\{s_n\}_{n \in \omega}$ de $\text{Niv}_\alpha T$ y con las promesas de los elementos de \mathbb{P} .

Más concretamente, dada cualquier condición $p_0 \in \mathbb{P} \cap N$, podemos definir una sucesión decreciente $\{p_m\}_{m \in \omega}$ de condiciones en $\mathbb{P} \cap N$ junto con funciones $\{h_m\}_{m \in \omega}$ definidas en subconjuntos finitos de $\text{Niv}_\alpha T$ que a su vez definan una función $h^* : \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ tal que $f_q = \bigcup_{m \in \omega} f_{p_m} \cup h^*$ sea una aproximación que, con la promesa dada por $\Gamma_{q, \gamma} = \bigcup_{m \in \omega} \Gamma_{p_m, \gamma}$ (para $\alpha \leq \gamma < \omega_1$), forme una condición completamente (N, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p_0$.

Y ahora observamos que si fijamos una función finita $\hat{h} : d \subset \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ que acote a f_{p_0} , podemos formar otra función \hat{h}' con el mismo dominio que siga acotando a f_{p_0} y que sea estrictamente menor que \hat{h} , y entonces podemos incorporar \hat{h}' a la definición de h_0 y acabar con que $\hat{h}' \subset h^* \subset f_q$, de modo que f_q está acotada por \hat{h} . Usaremos esta observación en la prueba del teorema siguiente:

Teorema 11.19 \mathbb{P} es α -propio, para todo ordinal numerable α no nulo.

DEMOSTRACIÓN: Razonamos por inducción sobre α . Más concretamente, vamos a probar que si $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha}$ es una torre de submodelos elementales de un $H(\kappa)$ tal que $\mathbb{P} \in N_0$ (luego también $T \in N_0$), $p \in \mathbb{P} \cap N_0$, $\alpha^* = \bigcup_{\delta < \alpha} (N_\delta \cap \omega_1)$ y $h : d \subset \text{Niv}_{\alpha^*} T \longrightarrow \mathbb{Q}$ acota a f_p , entonces existe una condición $q \leq p$ de altura α^* que es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\delta < \alpha$ y tal que f_q está acotada por h . Teniendo en cuenta la observación precedente al teorema, esto es justo lo que tenemos probado para $\alpha = 1$.

Si se cumple para α es fácil ver que también se cumple para $\alpha + 1$. En efecto, ahora tenemos una torre $\{N_\delta\}_{\delta < \alpha+1}$. Si α es un ordinal límite, entonces es trivial, pues, ante todo, $\alpha^* = (\alpha + 1)^*$, ya que N_α es la unión de los modelos anteriores, y por hipótesis de inducción existe una condición $q \leq p$ de altura α^* que es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\delta < \alpha$ y de modo que f_q está acotada por h . Pero entonces q es trivialmente (N_α, \mathbb{P}) -genérica, pues todo conjunto predenso en \mathbb{P} que esté en N_α está en un N_δ anterior.

Si $\alpha = \beta + 1$ entonces $\alpha^* < (\alpha + 1)^*$ y podemos definir una función h' sobre las restricciones a $\text{Niv}_{\alpha^*} T$ de los elementos del dominio de h haciendo que sobre cada uno de ellos tome el menor valor que toma h sobre sus extensiones. Es claro que h' también acota a f_p , luego por hipótesis de inducción existe una condición $q_0 \leq p$ de altura α^* que es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\delta \leq \beta$ y acotada por h' .

Ahora usamos que $\{N_\delta\}_{\delta \leq \beta} \in N_\alpha$, $\alpha^* = N_\beta \cap \omega_1 \in N_\alpha$ (pues es el menor ordinal numerable que no está en N_β , y es definible en $H(\kappa)$ a partir de $N_\beta \in N_\alpha$, luego está en N_α) y $p, h' \in N_\alpha$ (porque $T_{\alpha^*} \in N_\alpha$, luego $T_{\alpha^*} \subset N_\alpha$ por ser numerable, luego $h' \in N_\alpha$ por ser finita). Esto implica que la condición q_0 puede tomarse en N_α (y sigue estando acotada por h' , luego también por h). Por último, como \mathbb{P} es propio, existe $q \leq q_0$ de altura $N_\alpha \cap \omega_1 = (\alpha + 1)^*$ que es (N_α, \mathbb{P}) -genérica de altura $(\alpha + 1)^*$ y acotada por h . Obviamente, como extiende a q_0 , es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\delta < \alpha + 1$.

Sea ahora un ordinal límite λ , de modo que $\lambda^* = N_\lambda \cap \omega_1$, y supongamos que \mathbb{P} es α -propio para todo $\alpha < \lambda$. Tenemos una torre $\{N_\delta\}_{\delta < \lambda}$. El razonamiento es esencialmente idéntico al del caso $\alpha = 1$:

Fijamos una sucesión $\{\alpha_m\}_{m \in \omega}$ cofinal creciente en α con $\alpha_0 = 0$ y una enumeración $\{x_m\}_{m < \omega}$ de $\text{Niv}_{\alpha^*} T$. Fijamos también una función $j : \omega \longrightarrow \omega^2$ en las mismas condiciones que antes, es decir, $j(m) = (n, k) \rightarrow n \leq m$ y cada para (n, k) aparece infinitas veces en la sucesión $\{j(m)\}_{m \in \omega}$.

Vamos a definir una sucesión decreciente de condiciones $\{p_m\}_{m \in \omega}$, donde $p_m \in N_{\alpha_{m+1}}$ tiene altura $(\alpha_m + 1)^*$, y es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\delta \leq \alpha_m$, así como una sucesión creciente de funciones $\{h_m\}_{m \in \omega}$ definidas en subconjuntos finitos de $\text{Niv}_{\alpha^*} T$ tales que h_m acota a f_{p_m} , y enumeraciones $\{H_k^m\}_{k \in \omega}$ de los conjuntos Γ_{p_m, α^*} .

Observemos que $(\alpha_0 + 1)^* = 1^* = N_0 \cap \omega_1$. Sea h' la función definida sobre las restricciones a $\text{Niv}_{1^*} T$ de los elementos de $\mathcal{D}h$, a los cuales les asigna el menor valor que toma h sobre sus extensiones.

Por el caso $\alpha = 1$ ya probado, existe una condición (N_0, \mathbb{P}) -genérica $p_0 \leq p$ de altura $(\alpha_0 + 1)^* = N_0 \cap \omega_1$ y acotada por h' . Como $p, \mathbb{P}, N_0, 1^*, h' \in N_1 \prec H(\kappa)$, podemos exigir que $p_0 \in N_1$. Fijamos una enumeración $\{H_k^0\}_{k \in \omega}$ de Γ_{p_0, α^*} .

Supongamos ahora definidas p_0, \dots, p_m y h_0, \dots, h_{m-1} (entendiendo que, en el caso $m = 0$, la función h_{m-1} es una función con el mismo dominio que h pero estrictamente menor y que acote igualmente a p_0). Calculamos $j(m) = (n, k)$. Como $n \leq m$, está definido el requisito $H_k^n \in \Gamma_{p_n, \alpha^*} \subset \Gamma_{p_m, \alpha^*}$ y p_m cumple $H_k^n|_{(\alpha_m+1)^*}$, luego podemos tomar $h' \in H_k^n$ con dominio disjunto del dominio de h_{m-1} y que acote a f_{p_m} . La modificamos hasta una función h'' con el mismo dominio pero de modo que cumpla $\bigwedge x \in \mathcal{D}h'' h''(x) < h'(x)$. Definimos $h_m = h_{m-1} \cup h''$ y, si $x_m \notin \mathcal{D}h_m$, extendemos h_m para que contenga a x_m de modo que h_m siga acotando a f_{p_m} .

Ahora aplicamos la hipótesis de inducción a la torre $\{N_\delta\}_{\alpha_m+1 \leq \delta \leq \alpha_{m+1}}$, a $p_m \in N_{\alpha_m+1}$ y a la función h'_m definida sobre las restricciones a $\text{Niv}_{(\alpha_{m+1}+1)^*} T$ de los elementos de $\mathcal{D}h_m$ que asigna a cada uno de ellos el menor valor que h_m toma sobre sus extensiones. Obtenemos una condición $p_{m+1} \leq p_m$ de altura $(\alpha_{m+1} + 1)^*$ acotada por h'_m (luego por h_m) y que es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\alpha_m + 1 \leq \delta \leq \alpha_{m+1}$ (y de hecho para todo $\delta \leq \alpha_{m+1}$, porque extiende a p_m). Como todos los parámetros de estas condiciones están en $N_{\alpha_{m+1}+1}$, podemos tomar $p_{m+1} \in N_{\alpha_{m+1}+1}$. Ahora podemos fijar la enumeración $\{H_k^{m+1}\}_{k \in \omega}$ de $\Gamma_{p_{m+1}, \alpha^*}$ y continuar la construcción.

Obtenemos así una función $h^* = \bigcup_{m \in \omega} h_m : \text{Niv}_\alpha T \longrightarrow \mathbb{Q}$ tal que, para cada $x_k \in \text{Niv}_\alpha T$ y cada $m \geq k$ se cumple que $x_k \in \mathcal{D}h_m$, luego

$$f_{p_m}(x_k|_{(\alpha_m+1)^*}) < h_m(x_k) = h^*(x_k).$$

Esto hace que $f_q = \bigcup_{m \in \omega} f_{p_m} \cup h^*$ sea una aproximación acotada por h . Para cada $\alpha^* \leq \gamma < \omega_1$ definimos

$$\Gamma_{q, \gamma} = \bigcup_{m \in \omega} \Gamma_{p_m, \gamma}.$$

Es claro entonces que Γ_q es una promesa, y f_q la cumple, pues si $H \in \Gamma_{q, \alpha^*}$, existen $n, k \in \omega$ tales que $H = H_k^n$ y existen infinitos valores de m tales que $j(m) = (n, k)$. Fijado $t \subset \text{Niv}_{\alpha^*} T$ finito, para alguno de estos m se cumplirá que $t \subset \mathcal{D}h_{m-1}$, con lo que por construcción existe un $h' \in H = H_k^n$ tal que $h'' \subset h_m \subset h'$ (con lo que h' acota a f_q) y cuyo dominio es disjunto de t .

Por lo tanto, $q = (f_q, \Gamma_q) \in \mathbb{P}$ tiene altura α^* y extiende a todas las condiciones p_m , luego es (N_δ, \mathbb{P}) -genérica para todo $\delta < \alpha$, y f_q está acotada por h . ■

En particular, como \mathbb{P} es propio, el teorema 10.11 nos da que conserva \aleph_1 , y esto es lo único que nos faltaba para poder demostrar que cumple su finalidad:

Teorema 11.20 $\mathbf{1} \Vdash \check{T}$ es un árbol de Aronszajn especial.

DEMOSTRACIÓN: Basta probar la relativización del teorema a un modelo transitivo numerable M de ZFC. Fijamos un filtro genérico G y observamos que, como $\aleph_1^{M[G]} = \aleph_1^M$, se cumple que T sigue siendo un \aleph_1 -árbol en $M[G]$.

Para cada $\alpha < \omega_1^M$, el conjunto $D_\alpha = \{p \in \mathbb{P} \mid \alpha_p \geq \alpha\}$ es denso en \mathbb{P} por el teorema 11.15, luego $G \cap D_\alpha \neq \emptyset$. Esto implica que

$$f_G = \bigcup_{p \in G} f_p : T \longrightarrow \mathbb{Q}$$

es una función estrictamente creciente en $M[G]$. En particular f es inyectiva sobre las cadenas de T , luego T no tiene cadenas no numerables en $M[G]$, es decir, que sigue siendo un árbol de Aronszajn, obviamente especial. ■

Ahora sólo nos falta demostrar que \mathbb{P} es \aleph_2 -propio sobre isomorfismos. La prueba sería una ligera variante de la prueba de que \mathbb{P} es propio si no fuera porque ésta la hemos obtenido como caso particular de 11.18, por lo que tenemos que particularizar este teorema a lo realmente necesario para demostrar que \mathbb{P} es propio y luego generalizar la prueba para concluir que es \aleph_2 -propio sobre isomorfismos.

Teorema 11.21 \mathbb{P} es \aleph_2 -propio sobre isomorfismos.

DEMOSTRACIÓN: Tomemos un cardinal regular κ suficientemente grande, sean $N_0, N_1 \prec H(\kappa)$ submodelos elementales numerables en situación normal respecto de \aleph_2 con isomorfismo $I : N_0 \longrightarrow N_1$ de modo que $\mathbb{P} \in N_0 \cap N_1$ y sea $p_0 \in \mathbb{P} \cap N_0$.

Observemos que $T \in N_0 \cap N_1$, porque puede reconstruirse a partir de \mathbb{P} . Llamemos $\alpha = \omega_1 \cap N_0 = \omega_1 \cap N_1$. La igualdad se debe a la definición de situación normal pues, como $\omega_1 \in N_0 \cap N_1$, si un $\delta \in \omega_1 \cap N_0$ no estuviera en N_1 entonces sería $\omega_1 < \delta$.

Observemos que si $\delta < \alpha$ entonces $\text{Niv}_\delta T \in N_0 \cap N_1$, luego $\text{Niv}_\delta T \subset N_0 \cap N_1$, porque es numerable, luego el isomorfismo I deja invariantes los elementos de T de altura menor que α . Como también $\mathbb{Q} \subset N_0 \cap N_1$, resulta que I también deja invariantes a las aproximaciones de altura menor que α , y a los requisitos de altura menor que α . Concluimos que si $r \in \mathbb{P} \cap N_0$, entonces $f_{I(r)} = f_r$ y, para cada $\delta < \alpha$, $\Gamma_{I(r), \delta} = \Gamma_{r, \delta}$, donde usamos que son conjuntos numerables.

Fijamos una sucesión $\{\alpha_m\}_{m \in \omega}$ cofinal creciente en α con $\alpha_0 = \alpha_{p_0}$, una enumeración $\{x_m\}_{m \in \omega}$ de $\text{Niv}_\alpha T$ y una enumeración $\{D_m\}_{m \in \omega}$ de todos los abiertos densos en \mathbb{P} que están en N_0 . Fijamos una biyección $\bar{j} : \omega \longrightarrow \omega^3$ y definimos $j : \omega \longrightarrow \omega^2$ mediante

$$j(m) = \begin{cases} (n, k) & \text{si } \bar{j}(m) = (n, k, i) \wedge n \leq m, \\ (0, 0) & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

De este modo $j(m) = (n, k) \rightarrow n \leq m$ y cada par (n, k) aparece infinitas veces en la sucesión $\{j(m)\}_{m \in \omega}$. Vamos a definir una sucesión decreciente de

condiciones $\{p_m\}_{m \in \omega}$ en $\mathbb{P} \cap N_0$ de alturas $\alpha'_m \geq \alpha_m$, una sucesión $\{h_m\}_{m \in \omega}$ de funciones finitas $h_m : d_m \subset \text{Niv}_\alpha T \rightarrow \mathbb{Q}$, así como enumeraciones $\{H_k^m\}_{k \in \omega}$ de los conjuntos $\Gamma_{p_m, \alpha} \cup \Gamma_{I(p_m), \alpha}$.

Partimos del p_0 dado y fijamos una enumeración $\{H_k^0\}_{k \in \omega}$ de $\Gamma_{p_0, \alpha} \cup \Gamma_{I(p_0), \alpha}$. Supongamos definidos p_0, \dots, p_m (con las enumeraciones correspondientes de los $\Gamma_{p_i, \alpha}$) y h_0, \dots, h_{m-1} . Calculamos $j(m) = (n, k)$. Como $n \leq m$, está definido el requisito $H_k^n \in \Gamma_{p_n, \alpha} \cup \Gamma_{I(p_n), \alpha} \subset \Gamma_{p_m, \alpha} \cup \Gamma_{I(p_m), \alpha}$ y la p_m cumple $H_k^n|_{\alpha'_m}$, pues, en el caso de que $H_k^n \in \Gamma_{I(p_n), \alpha}$, tenemos que $H_k^n|_{\alpha'_m} \in \Gamma_{I(p_m), \alpha'_m} = \Gamma_{p_m, \alpha'_m}$. Por lo tanto, podemos tomar $h \in H_k^n$ con dominio disjunto del dominio de h_{m-1} que acote a f_{p_m} . Podemos modificarla hasta una función h' con el mismo dominio pero que cumpla $\bigwedge x \in \mathcal{D}h' h'(x) < h(x)$. Definimos $h_m = h_{m-1} \cup h$ y, si $x_m \notin \mathcal{D}h_m$ extendemos h_m para que esté definida sobre x_m y siga acotando a f_{p_m} .

Ahora usamos el teorema 11.17 para obtener $p_{m+1} \in D_m \cap N_0$ acotada por h_m tal que $p_{m+1} \leq p_m$. En la prueba del teorema se ve que podemos tomar p_{m+1} de altura arbitrariamente grande (menor que α). Por lo tanto, podemos suponer que $\alpha'_{p_{m+1}} = \alpha_{p_{m+1}} \geq \alpha_{m+1}$. Ahora podemos fijar la enumeración $\{H_k^{m+1}\}_{k \in \omega}$ de $\Gamma_{p_{m+1}, \alpha} \cup \Gamma_{I(p_{m+1}), \alpha}$ y continuar la construcción.

Obtenemos así una función $h^* = \bigcup_{m \in \omega} h_m : \text{Niv}_\alpha T \rightarrow \mathbb{Q}$ tal que, para cada $x_k \in \text{Niv}_\alpha T$ y cada $m \geq k$ se cumple que $x_k \in \mathcal{D}h_m$, luego

$$f_{p_m}(x_k|_{\alpha'_m}) < h_m(x_k) = h^*(x_k).$$

Esto hace que $f_q = \bigcup_{m \in \omega} f_{p_m} \cup h^*$ sea una aproximación. Para cada $\alpha \leq \gamma < \omega_1$ definimos

$$\Gamma_{q, \gamma} = \bigcup_{m \in \omega} (\Gamma_{p_m, \gamma} \cup \Gamma_{I(p_m), \gamma}).$$

Es claro entonces que Γ_q es una promesa y f_q la cumple, pues si $H \in \Gamma_{q, \alpha}$, existen $n, k \in \omega$ tales que $H = H_k^n$ y existen infinitos valores de m tales que $j(m) = (n, k)$. Fijado $t \subset \text{Niv}_\alpha T$ finito, para alguno de estos m se cumplirá que $t \subset \mathcal{D}h_{m-1}$, con lo que por construcción existe un $h \in H = H_k^n$ tal que $h' \subset h_m \subset h^*$ (con lo que h acota a f_q) y cuyo dominio es disjunto de t .

Por construcción tenemos que $q \leq p_m$ y $q \leq I(p_m)$, para todo $m \in \omega$. En efecto, por una parte, f_q extiende a cada $f_{p_m} = f_{I(p_m)}$ y, por otra parte, si $\alpha \leq \gamma < \omega_1$, trivialmente $\Gamma_{p_m, \gamma} \subset \Gamma_q$ y $\Gamma_{I(p_m), \gamma} \subset \Gamma_q$.

Sea G^* el filtro en \mathbb{P} generado por la sucesión $\{p_m\}_{m \in \omega}$. Claramente es (N_0, \mathbb{P}) -genérico, pues si $D \in N_0$ es abierto denso en \mathbb{P} , existe un $m \in \omega$ tal que $D = D_m$, y entonces tenemos que $p_m \in G^* \cap D \cap N_0$. Como G^* está acotado inferiormente por q , concluimos que q es completamente (N_0, \mathbb{P}) -genérica y en particular (N_0, \mathbb{P}) -genérica. Para probar que es (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica relativizamos la prueba a un modelo transitivo numerable M de ZFC y tomamos un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$. Tenemos que probar que $\bigwedge r \in N_0 \cap \mathbb{P} (r \in G \leftrightarrow I(r) \in G)$.

Observemos que $G^* \subset G$ y que $G \cap N_0 = G^* \cap N_0$, pues si consideramos el colapso transitivo $\phi : N_0 \longrightarrow \bar{N}_0$, entonces $\bar{G}^* \subset \bar{G}$ son dos filtros $\bar{\mathbb{P}}$ -genéricos sobre \bar{N}_0 , luego son iguales. Así pues, $r \in N_0 \cap G$ si y sólo si existe un $m \in \omega$ tal que $p_m \leq r$, luego $q \leq I(p_m) \leq I(r)$, luego $I(r) \in G$. Igualmente se prueba la implicación opuesta. ■

Nota Si llamamos $\hat{\mathbb{P}}$ al c.p.o. separativo construido a partir de \mathbb{P} en la prueba del teorema 4.57, se cumple que también es \aleph_2 -propio sobre isomorfismos. En efecto, si $\hat{\mathbb{P}} \in N_0 \cap N_1$, para dos submodelos elementales numerables de un $H(\kappa)$ en situación normal respecto de \aleph_2 y $\bar{p}_0 \in \hat{\mathbb{P}} \cap N_0$, entonces $T \in N_0 \cap N_1$, pues T puede reconstruirse a partir de $\hat{\mathbb{P}}$, luego también $\mathbb{P} \in N_0 \cap N_1$, y podemos tomar $p_0 \in \bar{p}_0 \cap N_0$. Por el teorema anterior existe una condición (N_0, N_1, \mathbb{P}) -genérica $q \leq p_0$, y basta probar que su clase $\bar{q} \in \hat{\mathbb{P}}$ es $(N_0, N_1, \hat{\mathbb{P}})$ -genérica, pues ciertamente $\bar{q} \leq \bar{p}_0$.

La comprobación es trivial. Por ejemplo, $q \Vdash \check{N}_0[\Gamma] \cap \check{V} = \check{N}_0$, luego lo mismo vale para \bar{q} , y esto significa que \bar{q} es $(N_0, \hat{\mathbb{P}})$ -genérico (e igualmente resulta ser $(N_1, \hat{\mathbb{P}})$ -genérico). Por otra parte tenemos que

$$q \Vdash \bigwedge r \in \check{N}_0 \cap \check{\mathbb{P}} (r \in \Gamma \leftrightarrow \check{h}(r) \in \Gamma),$$

donde $h : N_0 \longrightarrow N_1$ es el isomorfismo que cumple la definición de situación normal. Para probar el hecho análogo para \bar{q} relativizamos la prueba a un modelo transitivo numerable M de ZFC y tomamos un filtro $\hat{\mathbb{P}}$ -genérico sobre M tal que $\bar{q} \in \hat{G}$. Entonces, llamando $i : \mathbb{P} \longrightarrow \hat{\mathbb{P}}$ a la inmersión suprayectiva natural, se cumple que $G = i^{-1}[\hat{G}]$ es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$, luego $\bigwedge r \in N_0 \cap \mathbb{P} (r \in G \leftrightarrow h(r) \in G)$. Si $\bar{r} \in N_0 \cap \hat{\mathbb{P}}$, entonces $\bar{r} \in \hat{G}$ si y sólo si $r \in G$, si y sólo si $h(r) \in G$, si y sólo si $\bar{h}(\bar{r}) = h(r) \in \hat{G}$, luego, ciertamente

$$\bigwedge r \in N_0 \cap \hat{\mathbb{P}} (r \in \hat{G} \leftrightarrow h(r) \in \hat{G}).$$

Definición 11.22 A partir de aquí, si T es un árbol de Aronszajn, llamaremos \mathbb{P}_T al c.p.o. $\hat{\mathbb{P}}$ que acabamos de considerar en la nota precedente. Tenemos demostrado lo siguiente:

- a) \mathbb{P}_T es un c.p.o. separativo y α -propio (para todo ordinal $\alpha < \omega_1$).
- b) \mathbb{P}_T es \mathbb{D} -completo, para un cierto sistema de completitud numerablemente completo \mathbb{D} y, más aún, si tomamos \mathbb{P}_T en una extensión genérica $M[G]$ de un modelo transitivo numerable M de ZFC respecto de un c.p.o. que conserva $\mathcal{P}\omega$, entonces $\mathbb{D} \in M$.
- c) \mathbb{P}_T es \aleph_2 -propio sobre isomorfismos.
- d) $\mathbf{1} \Vdash \check{T}$ es un árbol de Aronszajn especial.

Además, es fácil ver que $|\mathbb{P}_T| \leq 2^{\aleph_1}$. En efecto, basta acotar el c.p.o. \mathbb{P} asociado a T , pues al pasar a $\hat{\mathbb{P}}$ el cardinal resultante será menor o igual. Observamos que el número de aproximaciones

$$f : \bigcup_{\delta < \alpha+1} \text{Niv}_\delta T \longrightarrow \mathbb{Q}$$

es a lo sumo $\aleph_0^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0}$ y, como $\alpha < \omega_1$, al variar α obtenemos a lo sumo $\aleph_1 \cdot 2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0}$. A su vez, el número de aplicaciones finitas $h : d \subset \text{Niv}_\gamma T \longrightarrow \mathbb{Q}$ es \aleph_0 , luego el número de requisitos de altura γ es a lo sumo $\aleph_0^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0}$, luego si Γ es una promesa, las posibilidades para Γ_γ son a lo sumo $(2^{\aleph_0})^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0}$ y las posibilidades para Γ son a lo sumo $(2^{\aleph_0})^{\aleph_1} = 2^{\aleph_1}$, luego a lo sumo hay $2^{\aleph_0} 2^{\aleph_1} = 2^{\aleph_1}$ condiciones en \mathbb{P} .

Estos son todos los ingredientes que necesitamos para adaptar la prueba de la consistencia del axioma de Martin para construir una iteración que especialice todos los árboles de Aronszajn conservando la hipótesis del continuo:

Teorema 11.23 *Sea M un modelo transitivo numerable de ZFC en la que $2^{\aleph_0} = \aleph_1$. Entonces existe una extensión genérica N de M que tiene los mismos cardinales y cofinalidades, la misma función del continuo y en la que todo árbol de Aronszajn es especial.*

DEMOSTRACIÓN: Llamemos $\kappa = (2^{\aleph_1})^M$. En todo lo que sigue ω_1 representará en realidad a ω_1^M . Vamos a definir una iteración $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \kappa}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \kappa})$ con soportes numerables y una sucesión $\{\sigma_\delta\}_{\delta < \kappa}$ de modo que $\sigma_\delta \in M^{\mathbb{P}_\delta}$ y, si llamamos $\tau_\delta = \text{p.o.}(\check{\omega}_1, \sigma_\delta)$, entonces

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \tau_\delta \text{ es un árbol de Aronszajn} \wedge \pi_\delta \text{ es el c.p.o. que especializa a } \tau_\delta.$$

Así, los resultados de este capítulo y el precedente (véase 10.34) implican que cada \mathbb{P}_δ es propio (luego conserva \aleph_1) y conserva $\mathcal{P}\omega$ (luego $\mathbb{1}_\delta \Vdash 2^{\aleph_0} = \aleph_1$), así como que tiene la c.c. \aleph_2 (por 10.46), luego conserva cardinales y cofinalidades (por 5.6).

Vamos a ver que en estas circunstancias (razonando en M), para cada $\delta < \kappa$, existe un conjunto $\bar{\pi}_\delta \subset \hat{\pi}_\delta$ tal que $|\bar{\pi}_\delta| \leq \kappa$ y para todo $\sigma \in \hat{\pi}_\delta$ existe un $\bar{\sigma} \in \bar{\pi}_\delta$ tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \sigma = \bar{\sigma}$. Podemos suponer además que $\mathbb{1}_{\pi_\delta} \in \bar{\pi}_\delta$.

Admitiendo esto, el subconjunto $\bar{\mathbb{P}}_\delta \subset \mathbb{P}_\delta$ formado por $p \in \mathbb{P}_\delta$ tales que $\bigwedge \epsilon < \delta p(\epsilon) \in \bar{\pi}_\epsilon$ es denso en \mathbb{P}_δ . En efecto, dada cualquier condición $p \in \mathbb{P}_\delta$, podemos formar otra condición \bar{p} de modo que $\bigwedge \epsilon < \delta \mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \bar{p}(\epsilon) = p(\epsilon)$, y es claro entonces que, ciertamente, $\bar{p} \in \mathbb{P}_\delta$ (y entonces de hecho $\bar{p} \in \bar{\mathbb{P}}_\delta$) y $\bar{p} \leq p \wedge p \leq \bar{p}$.

Además, se cumple que $|\bar{\mathbb{P}}_\delta| \leq \kappa$. En efecto, para $\bar{\mathbb{P}}_0 = \{\mathbb{1}\}$ es trivial. Si vale para δ , entonces $|\bar{\mathbb{P}}_{\delta+1}| = |\bar{\mathbb{P}}_\delta \times \bar{\pi}_\delta| \leq \kappa$, y si vale para todo $\delta < \lambda \leq \kappa$, entonces λ tiene $\kappa^{\aleph_0} = (2^{\aleph_1})^{\aleph_0} = \kappa$ subconjuntos numerables. Para cada uno de ellos, digamos s , (un posible soporte de una condición), $\bigcup_{\delta \in s} \bar{\pi}_\delta$ tiene cardinal κ , luego

hay a lo sumo $\kappa^{\aleph_0} = \kappa$ condiciones en $\bar{\mathbb{P}}_\lambda$ con soporte s , luego hay a lo sumo $\kappa \cdot \kappa = \kappa$ condiciones en $\bar{\mathbb{P}}_\lambda$.

A su vez, si $\nu \geq \aleph_1$ es un cardinal (siempre en M), el teorema 5.20 nos da que el número de buenos $\bar{\mathbb{P}}_\delta$ -nombres para subconjuntos de $\check{\nu}$ es a lo sumo

$$|\bar{\mathbb{P}}_\delta|^{<\aleph_2\nu} \leq |\bar{\mathbb{P}}_\delta|^{\aleph_1\nu} \leq (2^{\aleph_1})^\nu = 2^\nu,$$

y el teorema 5.22 nos da entonces que, en una extensión genérica $M[G]$ de M (respecto de $\bar{\mathbb{P}}_\delta$, se cumplirá que $(2^\nu)^{M[G]} \leq (2^\nu)^M$, y la otra desigualdad es trivial. Obviamente, lo mismo vale para extensiones respecto de \mathbb{P}_δ , pues son las mismas, y por lo tanto la función del continuo se conserva en todos los pasos de la iteración.

Probamos inductivamente la existencia de los conjuntos $\bar{\pi}_\delta$. Para ello suponemos que ya los hemos obtenido para ordinales $\epsilon < \delta$, lo cual implica, según hemos visto, que \mathbb{P}_δ conserva la función del continuo. En particular, si G_δ es un filtro \mathbb{P}_δ -genérico sobre M , tenemos que en $M[G_\delta]$ se cumple que $2^{\aleph_1} = \kappa$, luego $|(\pi_\delta)_{G_\delta}| \leq \kappa$, luego

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \forall f f : \check{\kappa} \longrightarrow \pi_\delta \text{ suprayectiva} \wedge f(0) = \mathbb{1}_{\pi_\delta},$$

luego podemos tomar un nombre ϕ_δ tal que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \phi_\delta : \check{\kappa} \longrightarrow \pi_\delta \text{ suprayectiva} \wedge \phi_\delta(0) = \mathbb{1}_{\pi_\delta}.$$

Para cada $\alpha \in \kappa$, tenemos que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \forall x \in \pi_\delta x = \phi_\delta(\check{\alpha})$, luego existe un $\xi_\alpha \in \hat{\pi}_\delta$ tal que $\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\delta} \Vdash \xi_\delta = \phi_\delta(\check{\alpha})$. Concretamente, podemos elegir $\xi_0 = \mathbb{1}_{\pi_\delta}$. Ahora basta tomar $\bar{\pi}_\delta = \{\xi_\alpha \mid \alpha < \kappa\}$.

Con esto tenemos probado que cualquier iteración de c.p.o.s en las condiciones descritas conserva la función del continuo en todos sus niveles. Más aún, se cumple que

$$\mathbb{1}_{\mathbb{P}_\kappa} \Vdash i_{\delta\kappa}(\tau_\delta) \text{ es un árbol de Aronszajn especial.}$$

En efecto, si G es un filtro \mathbb{P}_κ -genérico sobre M , en principio sabemos que $T = \tau_{\delta G_\delta}$ es un árbol de Aronszajn en $M[G_\delta]$ y que $\mathbb{Q}_\delta = \pi_{\delta, G_\delta}$ es el c.p.o. que lo especializa, por lo que T es un árbol de Aronszajn especial en $M[G_{\delta+1}]$, y esto sigue siendo trivialmente cierto en $M[G]$ (teniendo en cuenta que \aleph_1 se conserva).

Así pues, lo único que tenemos que cuidar es definir adecuadamente la iteración para que todo árbol de Aronszajn en $M[G]$ sea isomorfo a uno de los árboles $i_{\delta\kappa}(\tau_\delta)_G$. Pero vamos a simplificar un poco este objetivo. Sea $T \in M[G]$ un árbol de Aronszajn. Entonces $(|T| = \aleph_1)^{M[G]}$, luego podemos construir un árbol isomorfo de la forma $(\omega_1, R) \in M[G]$, para cierta relación $R \subset \omega_1 \times \omega_1$. Obviamente, T será especial si y sólo si lo es (ω_1, R) , luego podemos restringirnos a considerar árboles de esta forma. Fijamos una biyección $f : \omega_1 \times \omega_1 \longrightarrow \omega_1$ tal que $f \in M$ y consideramos $R^* = f[R] \in M[G]$. Entonces $R^* = \rho_G$, donde

$\rho \in M^{\mathbb{P}_\kappa}$ es un buen nombre para un subconjunto de $\check{\omega}_1$, que será de la forma $\rho = \bigcup_{\alpha < \omega_1} \{\check{\alpha}\} \times A_\alpha$, donde cada A_α es una anticadena en \mathbb{P}_κ . Como \mathbb{P}_κ cumple la c.c. \aleph_2 , tenemos que $|A_\alpha| \leq \aleph_1$, luego $\bigcup_{\alpha < \omega_1} \bigcup_{p \in A_\alpha} \text{sop } p$ tiene cardinal $\leq \aleph_1$, pero $\text{cf } \kappa = \text{cf } 2^{\aleph_1} > \aleph_1$, luego existe un $\alpha < \kappa$ tal que $\rho = i_{\alpha\kappa}(\rho')$, para cierto $\rho' \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$, luego $R^* = \rho'_{G_\alpha} \in M[G_\alpha]$, luego $(\omega_1, R) \in M[G_\alpha]$.

Concluimos que, para que todo árbol de Aronszajn en $M[G]$ sea especial basta con que todo árbol de Aronszajn de la forma $(\omega_1, R) \in M[G_\alpha]$ es especial, para todo $\alpha < \kappa$.

Finalmente construimos la iteración. Para ello consideramos una función $f : \kappa \longrightarrow \kappa \times \kappa$ suprayectiva, $f \in M$, tal que

$$\bigwedge \alpha \beta \gamma \in \kappa (f(\alpha) = (\beta, \gamma) \rightarrow \beta \leq \alpha).$$

(Véase la prueba de 8.38.) Además de $(\{\mathbb{P}_\delta\}_{\delta \leq \kappa}, \{\pi_\delta\}_{\delta < \kappa})$ y $\{\sigma_\delta\}_{\delta < \kappa}$, vamos a construir una sucesión $\{\{\leq_\epsilon^\delta\}_{\epsilon < \kappa}\}_{\delta < \kappa}$ de modo que $\{\leq_\epsilon^\delta\}_{\epsilon < \kappa}$ sea una enumeración de todos los buenos \mathbb{P}_δ -nombres de subconjuntos de $\omega_1 \times \omega_1$. Observemos que hemos probado que hay a lo sumo κ , y obviamente tiene que darse la igualdad, pero en cualquier caso podríamos admitir repeticiones.

Tomamos $\mathbb{P}_0 = \{\emptyset\}$ y elegimos una enumeración $\{\leq_\epsilon^0\}_{\epsilon < \kappa}$ de todos los buenos \mathbb{P}_0 -nombres para subconjuntos de $\omega_1 \times \omega_1$.

Supongamos construida la iteración $(\{\mathbb{P}_\beta\}_{\beta \leq \alpha}, \{\pi_\beta\}_{\beta < \alpha})$, junto con las sucesiones $\{\sigma_\beta\}_{\beta < \alpha}$ y $\{\{\leq_\epsilon^\beta\}_{\epsilon < \kappa}\}_{\beta \leq \alpha}$, para un $\alpha < \kappa$. Calculamos entonces el par $f(\alpha) = (\beta, \gamma)$ y, como $\beta \leq \alpha$, está definido \leq_γ^β . Claramente podemos tomar $\sigma_\alpha \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ de modo que

$$\mathbb{1} \Vdash (\omega_1, \sigma_\alpha) \text{ es un árbol de Aronszajn} \wedge$$

$$((\omega_1, i_\beta^\alpha(\leq_\gamma^\beta)) \text{ es un árbol de Aronszajn} \rightarrow \sigma_\alpha = i_\beta^\alpha(\leq_\gamma^\beta)).$$

A su vez, podemos tomar $\pi_\alpha \in M^{\mathbb{P}_\alpha}$ tal que

$$\mathbb{1} \Vdash \pi_\alpha \text{ es el c.p.o. que especializa a } (\omega_1, \sigma_\alpha).$$

Con esto queda definida la iteración $(\{\mathbb{P}_\beta\}_{\beta \leq \alpha+1}, \{\pi_\beta\}_{\beta < \alpha+1})$ junto con la sucesión $\{\sigma_\beta\}_{\beta < \alpha+1}$, y podemos elegir una enumeración $\{\leq_\epsilon^{\alpha+1}\}_{\epsilon < \kappa}$ de todos los buenos $\mathbb{P}_{\alpha+1}$ -nombres para subconjuntos de $\omega_1 \times \omega_1$.

Para ordinales límite la iteración está completamente determinada por la propia definición de iteración (con soportes numerables). Sólo falta probar que la iteración cumple lo requerido, es decir, tomamos un filtro \mathbb{P}_κ -genérico G , un $\beta < \kappa$ y un árbol de Aronszajn $(\omega_1, R) \in M[G_\beta]$. Entonces $R = (\leq_\gamma^\beta)_{G_\beta}$, para cierto γ . Consideramos un $\alpha < \kappa$ que cumpla $f(\alpha) = (\beta, \gamma)$, con lo que

$$\mathbb{1} \Vdash (\omega_1, i_\beta^\alpha(\leq_\gamma^\beta)) \text{ es un árbol de Aronszajn},$$

luego $\mathbb{1} \Vdash \sigma_\alpha = i_\beta^\alpha(\leq_\gamma^\beta)$, luego $(\tau_\alpha)_{G_\alpha} = (\omega_1, R)$, luego, según hemos visto, (ω_1, R) es especial en $M[G_{\alpha+1}]$ y también en $M[G]$. ■

Así pues, que todo árbol de Aronszajn sea especial, y en particular la hipótesis de Suslin, es consistente con $2^{\aleph_0} = \aleph_1$ y con cualquier determinación del resto de la función del continuo que podamos conseguir en un modelo. En particular tenemos la consistencia de ZFC + HCG + HS, y por lo tanto podemos concluir que $2^{\aleph_0} = \aleph_1 \not\rightarrow \Diamond$.

Apéndice A

Extensiones sin álgebras de Boole

En el capítulo IV, para definir la relación \Vdash asociada a un c.p.o. \mathbb{P} y para probar que cumple el teorema fundamental de la teoría de extensiones, nos hemos apoyado en que \mathbb{P} puede completarse hasta un álgebra de Boole completa \mathbb{B} y hemos demostrado en primer lugar el teorema para este tipo de álgebras. En este apéndice demostraremos que es posible definir \Vdash directamente a partir de \mathbb{P} , sin hacer referencia a \mathbb{B} , aunque la definición y la prueba del teorema fundamental se vuelven más sofisticadas.

Una de las ventajas de este enfoque es que permite construir extensiones genéricas de modelos de ZF – AP, y en este contexto no vale el enfoque que conocemos porque para demostrar que todo c.p.o. tiene una compleción se requiere el axioma de partes.

Empezamos observando que todos los resultados de las secciones 4.3 y 4.4 hasta el teorema 4.34 (exceptuando el teorema 4.20, que relaciona la definición de filtro genérico para c.p.o.s con la definición para álgebras de Boole completas) se demuestran sin hacer referencia para nada a álgebras de Boole (y, de hecho, es fácil ver que son demostrables en ZF – AP). Así, pues, partimos de ese punto para definir a continuación la relación \Vdash directamente a partir de \mathbb{P} . Empezamos con el caso de $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$:

Teorema A.1 *Existe una fórmula (metamatemática) $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$ con las variables libres $p, \mathbb{P}, \leq, \mathbf{1}, \sigma_1, \sigma_2$, que es absoluta para modelos transitivos de ZF–AP y que verifica:*

Si \mathbb{P} es un c.p.o., $p \in \mathbb{P}$ y $\sigma_1, \sigma_2 \in V^{\mathbb{P}}$, entonces $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$ si y sólo si

a) Para todo $(\pi_1, s_1) \in \sigma_1$, el conjunto

$$\{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge (q \leq s_1 \rightarrow \bigvee \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \wedge q \leq s_2 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2))\}$$

es denso bajo p .

b) Para todo $(\pi_2, s_2) \in \sigma_2$, el conjunto

$$\{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge (q \leq s_2 \rightarrow \bigvee \pi_1 s_1 ((\pi_1, s_1) \in \sigma_1 \wedge q \leq s_1 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2))\}$$

es denso bajo p .

DEMOSTRACIÓN: Definimos $H : V^{\mathbb{P}} \times V^{\mathbb{P}} \longrightarrow \mathcal{PP}$ de modo que $H(\sigma_1, \sigma_2)$ es el conjunto de todas las condiciones $p \in \mathbb{P}$ tales que

a) Para todo $(\pi_1, s_1) \in \sigma_1$, el conjunto

$$\{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge (q \leq s_1 \rightarrow \bigvee \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \wedge q \leq s_2 \wedge q \in H(\pi_1, \pi_2)))\}$$

es denso bajo p .

b) Para todo $(\pi_2, s_2) \in \sigma_2$, el conjunto

$$\{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge (q \leq s_2 \rightarrow \bigvee \pi_1 s_1 ((\pi_1, s_1) \in \sigma_1 \wedge q \leq s_1 \wedge q \in H(\pi_1, \pi_2)))\}$$

es denso bajo p .

Se trata de una definición por recursión sobre la relación bien fundada

$$(\pi_1, \pi_2) R (\sigma_1, \sigma_2) \leftrightarrow \pi_1 \in \text{ct } \sigma_1 \wedge \pi_2 \in \text{ct } \sigma_2.$$

Basta definir $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2 \equiv p \in H(\sigma_1, \sigma_2)$. El carácter absoluto de esta fórmula se demuestra fácilmente por inducción sobre la misma relación bien fundada. ■

A partir de aquí definimos recurrentemente una fórmula $p \Vdash \phi$ para cada fórmula metamatemática sin descriptores:

Definición A.2 Si \mathbb{P} es un c.p.o. y $\sigma_1, \sigma_2 \in V^{\mathbb{P}}$, definimos

$$p \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2 \equiv \{q \in \mathbb{P} \mid \bigvee \pi s ((\pi, s) \in \sigma_2 \wedge q \leq s \wedge q \Vdash \pi = \sigma_1)\}$$

es denso bajo p .

Para cada fórmula metamatemática $\phi(x_1, \dots, x_n)$ sin descriptores definimos la fórmula $p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ como la construida según las reglas siguientes:

- a) $p \Vdash \sigma_i = \sigma_j$ y $p \Vdash \sigma_i \in \sigma_j$ son las ya definidas,
- b) $p \Vdash \neg \phi \equiv \neg \bigvee q \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge q \Vdash \phi)$,
- c) $p \Vdash \phi \rightarrow \psi \equiv \{q \in \mathbb{P} \mid q \Vdash \phi \rightarrow q \Vdash \psi\}$ es denso bajo p ,
- d) $p \Vdash \bigwedge x \phi(x) \equiv \{r \in \mathbb{P} \mid \bigwedge \sigma (\sigma \text{ es un } \mathbb{P}\text{-nombre} \rightarrow r \Vdash \phi(\sigma))\}$ es denso bajo p .

En los teoremas siguientes ponemos entre paréntesis la hipótesis “sin descriptores” porque después veremos que todos los resultados son igualmente válidos para fórmulas con descriptores.

Teorema A.3 Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula (sin descriptores). Sea \mathbb{P} un c.p.o., sea $p \in \mathbb{P}$ y san $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{P}}$. Las afirmaciones siguientes son equivalentes:

- a) $p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$,
- b) $\bigwedge r \in \mathbb{P} (r \leq p \rightarrow r \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))$,
- c) $\{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\}$ es denso bajo p .

DEMOSTRACIÓN: Es inmediato que b) \rightarrow a) y que b) \rightarrow c). Probaremos las implicaciones a) \rightarrow b) y c) \rightarrow a) por inducción sobre la longitud de ϕ .

Supongamos que $\phi \equiv \sigma_1 = \sigma_2$.

a) \rightarrow b). Sea $r \leq p$. Por a) y el teorema A.1, si $(\pi_1, s_1) \in \sigma_1$ el conjunto

$$D_p = \{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge (q \leq s_1 \rightarrow \bigvee \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \wedge q \leq s_2 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2))\}$$

es denso bajo p .

Sea $s \leq r$. Entonces existe $q \in D_p$ tal que $q \leq s \leq r$ y, claramente, $q \in D_r$, luego tenemos que D_r es denso bajo r . Esto prueba la parte a) de A.1 para la fórmula $r \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$. Igualmente se comprueba la parte b), con lo que concluimos que $r \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$.

c) \rightarrow a). Supongamos que $\{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \sigma_1 = \sigma_2\}$ es denso bajo p . Sea $(\pi_1, s_1) \in \sigma_1$ y $t \leq p$. Entonces existe $r \leq t$ tal que $r \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$. Por A.1, el conjunto D_r es denso bajo r , luego existe un $q \in D_r$ tal que $q \leq r \leq t \leq p$. Entonces $q \in D_p$, lo que prueba que D_p es denso bajo p . Esto es la parte a) de A.1, e igualmente se prueba la parte b), con lo que concluimos que $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$.

Supongamos ahora que $\phi \equiv \sigma_1 \in \sigma_2$.

a) \rightarrow b). Sea $r \leq p$. Por a) tenemos que el conjunto

$$D = \{q \in \mathbb{P} \mid \bigvee \pi s ((\pi, s) \in \sigma_2 \wedge q \leq s \wedge q \Vdash \pi = \sigma_1)\}$$

es denso bajo p , luego también es denso bajo r , lo que prueba que $r \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2$.

c) \rightarrow a). Supongamos que $\{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2\}$ es denso bajo p . Si $t \leq p$, entonces existe un $r \leq t$ tal que $r \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2$, luego el conjunto D es denso bajo r , luego existe un $q \in D$ tal que $q \leq r \leq s \leq p$. Esto prueba que D es denso bajo p , luego $p \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2$.

Supongamos el teorema para ϕ y veámoslo para $\neg\phi$.

a) \rightarrow b). Suponemos que $p \Vdash \neg\phi$. Entonces $\neg\bigvee q \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge q \Vdash \phi)$ luego, dado $r \leq p$, también se cumple $\neg\bigvee q \in \mathbb{P} (q \leq r \wedge q \Vdash \phi)$, de donde $r \Vdash \neg\phi$.

c) \rightarrow a). Suponemos que $\{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \neg\phi\}$ es denso bajo p . Hemos de probar que $\neg\bigvee q \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge q \Vdash \phi)$. Si existiera tal q , podríamos tomar $r \leq q$ tal que $r \Vdash \neg\phi$. Por hipótesis de inducción se cumple a) \rightarrow b) para ϕ , luego $r \Vdash \phi$, pero esto contradice la definición de $r \Vdash \neg\phi$.

Supongamos el teorema para ϕ y ψ y veámoslo para $\phi \rightarrow \psi$.

a) \rightarrow b). Suponemos que $p \Vdash \phi \rightarrow \psi$. Esto significa que $\{q \in \mathbb{P} \mid q \Vdash \phi \rightarrow \psi\}$ es denso bajo p , luego es denso bajo q para todo $q \leq p$ y, por consiguiente, todo $q \leq p$ cumple $q \Vdash \phi \rightarrow \psi$.

c) \rightarrow a). Supongamos que el conjunto $\{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \phi \rightarrow \psi\}$ es denso bajo p . Hemos de probar que el conjunto $D = \{q \in \mathbb{P} \mid q \Vdash \phi \rightarrow q \Vdash \psi\}$ es denso bajo p y, en efecto, dado $q \leq p$, existe un $r \leq q$ tal que $r \Vdash \phi \rightarrow \psi$, de donde D es denso bajo r . Por consiguiente, existe un $s \leq r \leq q$ tal que $s \in D$.

Supongamos el teorema para ϕ y veámoslo para $\bigwedge x \phi(x)$.

a) \rightarrow b). Supongamos que $p \Vdash \bigwedge x \phi(x)$. Esto significa que el conjunto

$$D = \{r \in \mathbb{P} \mid \bigwedge \sigma \in V^{\mathbb{P}} r \Vdash \phi(\sigma)\}$$

es denso bajo p , luego es denso bajo r para todo $r \leq p$, luego todo $r \leq p$ cumple $r \Vdash \bigwedge x \phi(x)$.

c) \rightarrow a). Supongamos que $\{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \bigwedge x \phi(x)\}$ es denso bajo p . Si $s \leq p$, existe un $r \leq s$ tal que $r \Vdash \bigwedge x \phi(x)$, luego el conjunto D anterior es denso bajo r , luego existe un $q \leq s \leq p$ tal que $q \in D$. Esto para todo $s \leq p$, luego D es denso bajo p , y esto significa que $p \Vdash \bigwedge x \phi(x)$. ■

El teorema siguiente contiene lo básico del teorema fundamental:

Teorema A.4 *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula (sin descriptores) con la lo sumo x_1, \dots, x_n como variables libres. Sea M un modelo transitivo de ZF–AP, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o., sean $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{P}}$ y sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M . Entonces*

a) Si $p \in G$ y $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$, entonces $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$.

b) Si $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$, entonces $\bigvee p \in G (p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$.

DEMOSTRACIÓN: Por inducción sobre la longitud de ϕ . Supongamos primero que $\phi \equiv \sigma_1 = \sigma_2$.

a) Si $(p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2)^M$, de hecho tenemos que $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$, pues la fórmula es absoluta. Suponemos además que $p \in G$ y hemos de probar que se cumple $(\sigma_{1G} = \sigma_{2G})^{M[G]}$, es decir, que $\sigma_{1G} = \sigma_{2G}$.

Consideramos en $M^{\mathbb{P}} \times M^{\mathbb{P}}$ la relación dada por $(\pi_1, \pi_2) R (\sigma_1, \sigma_2)$ si y sólo si cada π_i está en el dominio del correspondiente σ_i . Obviamente está bien fundada. Demostraremos el teorema por inducción sobre R . Tomamos σ_1 y $\sigma_2 \in M^{\mathbb{P}}$ y suponemos como hipótesis de inducción que si π_i está en el dominio de σ_i , $q \in G$ y $q \Vdash \pi_1 = \pi_2$ entonces $\pi_{1G} = \pi_{2G}$. Suponemos así mismo que $p \in G$ cumple $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$ y hemos de probar que $\sigma_{1G} = \sigma_{2G}$. Por simetría basta probar una inclusión.

Tomamos $x \in \sigma_{1G}$, con lo que existe $(\pi_1, s_1) \in \sigma_1$ de modo que $x = \pi_{1G}$ y $s_1 \in G$. Sea $r \in G$ tal que $r \leq p \wedge r \leq s_1$. Por el teorema anterior $r \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$, lo que significa que el conjunto

$$E = \{q \in \mathbb{P} \mid q \leq r \wedge (q \leq s_1 \rightarrow \bigvee \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \wedge q \leq s_2 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2))\}$$

es denso bajo r . Claramente $E = E^M \in M$, y el teorema 4.18 nos da que existe un $q \in G \cap E$. Entonces $q \leq r \leq s_1$, luego existe $(\pi_2, s_2) \in \sigma_2$ según la definición de E . En particular $q \Vdash \pi_1 = \pi_2$, luego por hipótesis de inducción $x = \pi_{1G} = \pi_{2G}$. Por otra parte, $q \leq s_2$, luego $s_2 \in G$, lo que implica que $x = \pi_{2G} \in \sigma_{2G}$, como queríamos probar.

b) Supongamos ahora como hipótesis de inducción que si π_i está en el dominio de σ_i y $\pi_{1G} = \pi_{2G}$ entonces existe un $q \in G$ tal que $q \Vdash \pi_1 = \pi_2$. Suponemos también que $\sigma_{1G} = \sigma_{2G}$. Sea D el conjunto de las condiciones $r \in \mathbb{P}$ tales que $r \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$ o bien cumplen una de las dos afirmaciones siguientes:

$$\text{a')} \bigvee \pi_1 s_1 ((\pi_1, s_1) \in \sigma_1 \wedge r \leq s_1 \wedge \bigwedge \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \wedge q \in \mathbb{P} \wedge q \leq s_2 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2 \rightarrow q \perp r)),$$

$$\text{b')} \bigvee \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \wedge r \leq s_2 \wedge \bigwedge \pi_1 s_1 q ((\pi_1, s_1) \in \sigma_1 \wedge q \in \mathbb{P} \wedge q \leq s_1 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2 \rightarrow q \perp r)),$$

Se tiene que $D \in M$ porque la fórmula que lo define es absoluta. Veamos que es denso en \mathbb{P} . Para ello tomamos $p \in \mathbb{P}$ y observamos que, o bien $p \Vdash \sigma_1 = \sigma_2$, en cuyo caso $p \in D$, o bien no se cumple una de las dos propiedades a) o b) del teorema A.1. Supongamos, por ejemplo, que no se cumple a). Esto significa que existe un par $(\pi_1, s_1) \in \sigma_1$ tal que el conjunto

$$\{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \wedge (q \leq s_1 \rightarrow \bigvee \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \wedge q \leq s_2 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2))\}$$

no es denso bajo p . Por consiguiente existe un $r \leq p$ tal que

$$\bigwedge q \in \mathbb{P} (q \leq r \rightarrow (q \leq s_1 \wedge \bigwedge \pi_2 s_2 ((\pi_2, s_2) \in \sigma_2 \rightarrow \neg(q \leq s_2 \wedge q \Vdash \pi_1 = \pi_2)))).$$

Vamos a probar que r cumple a'), con lo que $r \in D \wedge r \leq p$. La propiedad anterior aplicada a $q = r$ nos da que $r \leq s_1$. Si $(\pi_2, s_2) \in \sigma_2$, $q \in \mathbb{P}$, $q \leq s_2$ y $q \Vdash \pi_1 = \pi_2$, entonces $q \perp r$, pues si existiera una extensión común $q' \leq q \wedge q' \leq r$ entonces tendríamos $q' \leq r \wedge q' \leq s_1 \wedge q' \leq s_2 \wedge q' \Vdash \pi_1 = \pi_2$.

Así pues, D es denso en \mathbb{P} , luego existe $r \in D \cap G$. Ahora bien, r no puede cumplir a') ni b'), pues si, por ejemplo, existiera un par $(\pi_1, s_1) \in \sigma_1$ según a') tendríamos que $r \leq s_1$, luego $s_1 \in G$, luego $\pi_{1G} \in \sigma_{1G} = \sigma_{2G}$, luego $\pi_{1G} = \pi_{2G}$ con $(\pi_2, s_2) \in \sigma_2$ y $s_2 \in G$. Por hipótesis de inducción existe $q_0 \in G$ tal que $q_0 \Vdash \pi_1 = \pi_2$. Sea $q \in G$ tal que $q \leq q_0 \wedge q \leq s_2$. Por el teorema anterior $q \Vdash \pi_1 = \pi_2$ y entonces, por a'), $q \perp r$, lo cual es absurdo porque ambos están en G .

Supongamos ahora que $\phi \equiv \sigma_1 \in \sigma_2$. Como $p \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2$ es absoluta para modelos transitivos, podemos olvidar las relativizaciones que aparecen en el enunciado.

a) Sea $p \in G$ tal que $p \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2$. Entonces el conjunto

$$D = \{q \in \mathbb{P} \mid \forall \pi s ((\pi, s) \in \sigma_2 \wedge q \leq s \wedge q \Vdash \pi = \sigma_1)\}$$

es denso bajo p y claramente $D \in M$. Sea $q \in G \cap D$. Sea $(\pi, s) \in \sigma_2$ tal que $q \leq s \wedge q \Vdash \pi = \sigma_1$. Como $q \leq s$ se cumple que $s \in G$, luego $\pi_G \in \sigma_{2G}$. Como $q \in G$ y $q \Vdash \pi = \sigma_1$, por a) para la fórmula $\pi = \sigma_1$ se cumple que $\pi_G = \sigma_{1G}$, y así $\sigma_{1G} \in \sigma_{2G}$.

b) Suponemos ahora que $\sigma_{1G} \in \sigma_{2G}$. Entonces $\sigma_{1G} = \pi_G$, con $(\pi, s) \in \sigma_2$ y $s \in G$. Por b) para la fórmula $\pi = \sigma_1$ existe un $r \in G$ tal que $r \Vdash \pi = \sigma_1$. Sea $p \in G$ tal que $p \leq s$ y $p \leq r$. Veamos que el conjunto D anterior es denso bajo p , y así tendremos que $p \Vdash \sigma_1 \in \sigma_2$.

Si $q \leq p$ existe $(\pi, s) \in \sigma_2$ (el par que ha habíamos elegido) de modo que $q \leq p \leq s \wedge q \Vdash \pi = \sigma_1$ (pues $q \leq p \leq r \wedge r \Vdash \pi = \sigma_1$), luego $q \in D$.

Supongamos el teorema para ϕ y veámoslo para $\neg\phi$.

a) Sea $p \in G$ tal que $(p \Vdash \neg\phi)^M$, es decir, $\neg\forall q \in \mathbb{P} (q \leq p \wedge (q \Vdash \phi)^M)$. Hemos de probar $\neg\phi^{M[G]}$. Si se cumpliera $\phi^{M[G]}$, por a) existe un $r \in G$ tal que $(r \Vdash \phi)^M$. Sea $q \in G$ tal que $q \leq p \wedge q \leq r$. Entonces tenemos $(q \leq r \wedge r \Vdash \phi)^M$. Por el teorema anterior relativizado a M concluimos que $(q \Vdash \phi)^M$, contradicción.

b) Supongamos $\neg\phi^{M[G]}$ y sea $D = \{p \in \mathbb{P} \mid (p \Vdash \phi)^M \vee (p \Vdash \neg\phi)^M\}$. Entonces $D \in M$ y es denso por definición de $p \Vdash \neg\phi$. Sea $p \in D \cap G$. No puede ser $(p \Vdash \phi)^M$ ya que entonces por a) tendríamos $\phi^{M[G]}$. Por consiguiente $(p \Vdash \neg\phi)^M$.

Supongamos el teorema para ϕ y ψ y demostrémoslo para $\phi \rightarrow \psi$.

a) Si $p \in G$ cumple $(p \Vdash \phi \rightarrow \psi)^M$, hemos de probar que $\phi^{M[G]} \rightarrow \psi^{M[G]}$, luego suponemos $\phi^{M[G]}$. Por b) existe $q \in G$ tal que $(q \Vdash \phi)^M$. Sea $r \in G$ tal que $r \leq p \wedge r \leq q$. Tenemos que el conjunto $\{s \in \mathbb{P} \mid (s \Vdash \phi)^M \rightarrow (s \Vdash \psi)^M\}$ es denso bajo p , luego el conjunto $\{s \in \mathbb{P} \mid s \leq r \wedge (s \Vdash \phi)^M \rightarrow (s \Vdash \psi)^M\}$ es denso bajo r y está en M , por lo que podemos tomar $s \in G$ tal que $s \leq r \wedge (s \Vdash \phi)^M \rightarrow (s \Vdash \psi)^M$. Como $s \leq r \leq q$, se cumple que $(s \Vdash \phi)^M$ y así también $(s \Vdash \psi)^M$. Como $s \in G$, por a) concluimos $\psi^{M[G]}$.

b) Supongamos $\phi^{M[G]} \rightarrow \psi^{M[G]}$, es decir, $\neg\phi^{M[G]} \vee \psi^{M[G]}$. Distinguimos los dos casos.

Si $\neg\phi^{M[G]}$, por el caso de $\neg\phi$ ya demostrado, contamos con a) y b) para $\neg\phi$. Así pues, existe un $p \in G$ tal que $(p \Vdash \neg\phi)^M$. Veamos que $(p \Vdash \phi \rightarrow \psi)^M$, para lo cual hemos de probar que el conjunto $D = \{q \in \mathbb{P} \mid (q \Vdash \phi)^M \rightarrow (q \Vdash \psi)^M\}$ es denso bajo p . Ahora bien, si $q \leq p$ entonces $(q \Vdash \neg\phi)^M$, luego $\neg(q \Vdash \phi)^M$ y trivialmente $(q \Vdash \phi)^M \rightarrow (q \Vdash \psi)^M$. Así pues, $q \in D$.

Si $\psi^{M[G]}$ existe un $p \in G$ tal que $(p \Vdash \psi)^M$. Como antes, D es denso bajo p , pues si $q \leq p$ entonces $(q \Vdash \psi)^M$ y también $(q \Vdash \phi)^M \rightarrow (q \Vdash \psi)^M$.

Supongamos el teorema para $\phi(x)$ y probémoslo para $\lambda x \phi(x)$.

a) Sea $p \in G$ tal que $(p \Vdash \bigwedge x \phi(x))^M$. Entonces el conjunto

$$D = \{r \in \mathbb{P} \mid \bigwedge \sigma \in M^{\mathbb{P}} (r \Vdash \phi(\sigma))^M\}$$

es denso bajo p . Como $D \in M$ existe un $r \in D \cap G$. Para todo $\sigma \in M^{\mathbb{P}}$ tenemos que $(r \Vdash \phi(\sigma))^M$, luego por a) se cumple $\phi^{M[G]}(\sigma_G)$. Así pues, concluimos que $\bigwedge x \in M[G] \phi^{M[G]}(x)$.

b) Si $\bigwedge x \in M[G] \phi^{M[G]}(x)$, hemos de encontrar una condición $p \in G$ tal que el conjunto

$$D = \{q \in \mathbb{P} \mid \bigwedge \sigma \in M^{\mathbb{P}} (q \Vdash \phi(\sigma))^M\}$$

sea denso bajo p . De hecho basta probar que existe un $p \in D \cap G$, pues en tal caso todo $q \leq p$ está en D . Supongamos, por reducción al absurdo, que $D \cap G = \emptyset$. Por el teorema 4.18, si $D \cap E = \emptyset$, existe un $p \in G$ incompatible con todas las condiciones de D . Sea $E = \{q \in \mathbb{P} \mid \bigvee \sigma \in M^{\mathbb{P}} (q \Vdash \neg \phi(\sigma))^M\} \in M$ y veamos que es denso bajo p .

En efecto, si $q \leq p$ se cumple que q es incompatible con todos los elementos de D y, en particular, $q \notin D$. Por lo tanto existe un $\sigma \in M^{\mathbb{P}}$ tal que $\neg(q \Vdash \phi(\sigma))^M$. Ha de existir un $r \leq q$ tal que $(r \Vdash \neg \phi(\sigma))^M$ o, de lo contrario, por definición de $r \Vdash \neg \phi$, para todo $r \leq q$ existiría un $s \leq r$ tal que $(s \Vdash \phi(\sigma))^M$. Esto significaría que el conjunto $\{r \in \mathbb{P} \mid (r \Vdash \phi(\sigma))^M\}$ sería denso bajo q , y tendríamos así que $(q \Vdash \phi(\sigma))^M$, contradicción.

Sea, pues, $r \leq q$ tal que $(r \Vdash \neg \phi(\sigma))^M$. Así $r \leq q \wedge r \in E$.

Como G es genérico y $p \in G$, existe un $q \in E \cap G$, luego $(q \Vdash \neg \phi(\sigma))^M$ para un cierto $\sigma \in M^{\mathbb{P}}$. Por a) aplicado a $\neg \phi$ (usamos el paso ya probado de la inducción correspondiente a $\neg \phi$) obtenemos $\neg \phi(\sigma_G)^{M[G]}$, en contradicción con la hipótesis. ■

Antes de sacar consecuencias vamos a extender la definición de \Vdash a fórmulas con descriptores.

Definición A.5 Sea ϕ una fórmula metamatemática y sea ψ una fórmula sin descriptores que sea equivalente a ϕ bajo los axiomas de extensionalidad y del conjunto vacío (podemos dar un procedimiento explícito para fijar una en concreto). Definimos

$$p \Vdash \phi \equiv p \Vdash \psi.$$

Del teorema siguiente se desprende en particular que la elección de ψ es irrelevante. La hipótesis entre paréntesis que excluye a los axiomas de reemplazo y partes es provisional. La podremos eliminar en cuanto sepamos que las extensiones genéricas satisfacen todo ZFC.

Teorema A.6 Sean $\phi(x_1, \dots, x_n)$ y $\psi(x_1, \dots, x_n)$ fórmulas equivalentes en ZF (sin los axiomas de reemplazo y partes). Si \mathbb{P} es un c.p.o. $p \in \mathbb{P}$ y $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ son \mathbb{P} -nombres se cumple

$$p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \leftrightarrow p \Vdash \psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n).$$

DEMOSTRACIÓN: Supongamos en primer lugar que ϕ y ψ no tienen descriptores. Si se cumpliera $p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ pero $\neg p \Vdash \psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, entonces existe $q \leq p$ tal que $q \Vdash \neg\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$. En efecto, en caso contrario para todo $q \leq p$ se tendría $\neg q \Vdash \neg\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, luego existiría un $r \leq q$ tal que $r \Vdash \psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$. Esto significa que el conjunto $\{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)\}$ sería denso bajo p y, por lo tanto, se cumpliría $p \Vdash \psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$.

Así pues, se cumple la sentencia

$$\begin{aligned} & \forall \mathbb{P} \sigma_1 \cdots \sigma_n pq (\mathbb{P} \text{ es un c.p.o.} \wedge \sigma_1, \dots, \sigma_n \in V^{\mathbb{P}} \wedge p \in \mathbb{P} \wedge q \in \mathbb{P} \wedge q \leq p \wedge \\ & \quad p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n) \wedge q \Vdash \neg\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n)). \end{aligned}$$

Por el teorema de reflexión existe un modelo transitivo numerable M de ZFC tal que esta sentencia es absoluta para M y, por lo tanto, es verdadera en M . Entonces tenemos un c.p.o. $\mathbb{P} \in M$, nombres $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{P}}$ y condiciones $q \leq p$ tales que

$$(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M \wedge (q \Vdash \neg\psi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M.$$

Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$ (y por lo tanto $p \in G$). Por el teorema anterior debería cumplirse $\phi^{M[G]} \wedge \neg\psi^{M[G]}$, pero $M[G]$ es un modelo de ZF (menos los axiomas de partes y reemplazo), luego $\phi^{M[G]}$ es equivalente a $\psi^{M[G]}$, contradicción.

Ahora es claro que la definición anterior no depende de la elección de ψ , es decir, si ϕ es una fórmula con descriptores y ψ y ψ' son fórmulas sin descriptores equivalentes a ϕ bajo los axiomas de extensionalidad y vacío, entonces ψ y ψ' son equivalentes entre sí bajo estos axiomas, luego acabamos de probar que $p \Vdash \psi$ es equivalente a $p \Vdash \psi'$. Similarmente se llega ahora al caso general del teorema. ■

Es fácil ver que todas las propiedades de \Vdash que teníamos para fórmulas sin descriptores (incluyendo las que hemos usado como definición) valen ahora para fórmulas arbitrarias.

Teorema A.7 (Teorema fundamental de la teoría de extensiones) *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n)$ una fórmula con a lo sumo las variables libres indicadas. Sea M un modelo transitivo de ZF–AP, $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{P}}$.*

- a) *Si M es numerable y $p \in \mathbb{P}$ entonces $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$ si y sólo si para todo filtro \mathbb{P} -genérico sobre M con $p \in G$ se cumple $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$.*
- b) *Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M entonces*

$$\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}) \leftrightarrow \forall p \in G (p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M.$$

DEMOSTRACIÓN: a) Si p cumple la condición sobre filtros genéricos consideramos el conjunto

$$D = \{r \in \mathbb{P} \mid (r \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M\} \in M.$$

Veamos que D es denso bajo p . En caso contrario existiría un $q \leq p$ tal que $\neg \forall r \in \mathbb{P}(r \leq q \wedge r \in D)$, o sea, $\neg \forall r \in \mathbb{P}(r \leq q \wedge r \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$, y esto implica que $(q \Vdash \neg \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$. Sea G un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M tal que $q \in G$ (aquí usamos que M es numerable). Como $q \leq p$, también $p \in G$, pero entonces el teorema A.4 nos da que $\phi^{M[G]} \wedge \neg \phi^{M[G]}$, contradicción.

Por consiguiente (D es denso bajo p) M y el teorema A.3 nos permite concluir que $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$.

Supongamos ahora que $(p \Vdash \phi(\sigma_1, \dots, \sigma_n))^M$. Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M y $p \in G$, entonces el teorema A.4 nos da $\phi^{M[G]}(\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG})$. (Esta implicación no requiere la numerabilidad de M .)

b) es consecuencia directa de A.4. ■

A partir de aquí ya podemos probar sin ningún cambio el teorema del modelo genérico 4.49 y, en general, todos los resultados básicos de la teoría de extensiones genéricas sin hacer referencia en absoluto a álgebras de Boole.

Formalización de la relación fundamental Hemos definido $p \Vdash \phi$ para fórmulas metamatemáticas ϕ , de modo que “ $p \Vdash \phi$ ” no es una fórmula, sino una fórmula distinta para cada fórmula metamatemática ϕ . Sin embargo, la definición recurrente de $p \Vdash \phi$ puede reinterpretarse como la definición de un único término $p \Vdash_{\mathbb{P}} \phi$ con las variables libres p , ϕ y \mathbb{P} , \leq , $\mathbf{1}$, de modo que se demuestra que si $\phi \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$, \mathbb{P} es un c.p.o. entonces $(p \Vdash_{\mathbb{P}} \phi) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$ es una fórmula cuyas variables libres son p , \mathbb{P} , \leq , $\mathbf{1}$ y las variables libres de ϕ . (Consideramos únicamente fórmulas que no contengan las cuatro variables precedentes.)

Más concretamente, $p \Vdash_{\mathbb{P}} (x = y)$ y $p \Vdash_{\mathbb{P}} (x \in y)$ no son sino las formalizaciones de las fórmulas metamatemáticas definidas en A.1 y A.2, respectivamente y, en general, $p \Vdash_{\mathbb{P}} \phi$ se define por inducción sobre la longitud de ϕ exactamente igual que en A.2. La demostración del esquema teoremático A.7 se adapta trivialmente para probar el (único) teorema siguiente:

Teorema A.8 (Teorema fundamental de la teoría de extensiones) *Sea $\phi(x_1, \dots, x_n) \in \text{Form}(\mathcal{L}_{tc})$ una fórmula con a lo sumo las variables libres indicadas. Sea M un conjunto transitivo tal que $M \models \text{ZF-AP}$, sea $\mathbb{P} \in M$ un c.p.o. y $\sigma_1, \dots, \sigma_n \in M^{\mathbb{P}}$.*

a) *Si M es numerable y $p \in \mathbb{P}$ entonces $M \models [p] \Vdash_{[\mathbb{P}]} \phi_{[\mathbb{P}]}[\sigma_1, \dots, \sigma_n]$ si y sólo si para todo filtro \mathbb{P} -genérico sobre M con $p \in G$ se cumple*

$$M[G] \models \phi[\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}].$$

b) *Si G es un filtro \mathbb{P} -genérico sobre M entonces*

$$M[G] \models \phi[\sigma_{1G}, \dots, \sigma_{nG}] \leftrightarrow \bigvee_{p \in G} M \models [p] \Vdash_{[\mathbb{P}]} \phi[\sigma_1, \dots, \sigma_n].$$

Apéndice B

Conjuntos cerrados no acotados y estacionarios

En este apéndice vamos a desarrollar una teoría sobre conjuntos cerrados no acotados y estacionarios análoga a la expuesta en el capítulo VI de [TC], pero en un contexto distinto. En lugar de tratar con subconjuntos de ordinales vamos a fijar un conjunto no numerable arbitrario A y un cardinal regular no numerable $\kappa \leq |A|$, y vamos a trabajar con subconjuntos del conjunto

$$\mathcal{P}_\kappa A = \{X \in \mathcal{P}A \mid |X| < \kappa\}.$$

B.1 Subconjuntos de $\mathcal{P}_\kappa A$

Definición B.1 Diremos que un conjunto $C \subset \mathcal{P}_\kappa A$ es *cerrado* si para toda sucesión creciente¹ (respecto de la inclusión) $\{x_\delta\}_{\delta < \mu}$ con $\mu < \kappa$ de elementos de C se cumple que $\bigcup_{\delta < \mu} x_\delta \in C$.

Diremos que C es *no acotado* si para todo $x \in \mathcal{P}_\kappa A$ existe un $y \in C$ tal que $x \subset y$. Como es habitual, c.n.a. significará “cerrado no acotado”.

Por ejemplo, si $x \subset A$ cumple $|x| < \kappa$, es claro que $\hat{x} = \{y \in \mathcal{P}_\kappa A \mid x \subset y\}$ es c.n.a.

Una de las propiedades básicas de los conjuntos c.n.a. es la siguiente:

Teorema B.2 *La intersección de menos de κ conjuntos cerrados no acotados es cerrada no acotada.*

¹No perdemos generalidad si suponemos que μ es un cardinal infinito, pues dada una sucesión $\{x_\delta\}_{\delta < \alpha}$, con $\alpha < \mu$, si $\alpha = \beta + 1$ entonces $\bigcup_{\delta < \alpha} x_\delta = x_\beta \in C$ trivialmente, y si α es un límite tomamos $\mu = \text{cf } \alpha$ y una sucesión cofinal creciente $\{\delta_\gamma\}_{\gamma < \mu}$, y entonces $\bigcup_{\delta < \alpha} x_\delta = \bigcup_{\gamma < \mu} x_{\delta_\gamma}$. En particular, si $\kappa = \aleph_1$ basta considerar sucesiones $\{x_n\}_{n \in \omega}$.

DEMOSTRACIÓN: Es inmediato que la intersección de cualquier familia de subconjuntos cerrados de $\mathcal{P}_\kappa A$ es cerrada.

Veamos ahora que si C_1 y C_2 son c.n.a.s, entonces $C_1 \cap C_2$ también lo es. Para ello fijamos $x \in \mathcal{P}_\kappa A$ y vamos tomando extensiones

$$x \subset x_0 \subset x_1 \subset x_2 \subset \dots$$

de modo que $x_{2n} \in C_1$ y $x_{2n+1} \in C_2$. Entonces

$$x \subset y = \bigcup_{n \in \omega} x_{2n} = \bigcup_{n \in \omega} x_{2n+1} \in C_1 \cap C_2,$$

luego $C_1 \cap C_2$ no está acotado. Supongamos ahora que existe un cardinal $\mu < \kappa$ tal que existe una familia $\{C_\delta\}_{\delta < \mu}$ de c.n.a.s cuya intersección no es c.n.a. Podemos suponer que μ es el menor posible (necesariamente infinito, por la parte ya probada). En particular, tenemos que, para todo $\delta < \mu$, la intersección $D_\delta = \bigcap_{\gamma < \delta} C_\gamma$ es c.n.a., y $\bigcap_{\delta < \mu} D_\delta = \bigcap_{\delta < \mu} C_\delta$, luego no perdemos generalidad si suponemos que la sucesión $\{C_\delta\}_{\delta < \mu}$ es decreciente. Vamos a probar que no está acotada y tendremos una contradicción.

Dado $x \in \mathcal{P}_\kappa A$ vamos a construir una sucesión $\{x_\delta\}_{\delta < \mu}$ creciente en $\mathcal{P}_\kappa A$. Tomamos $x_0 \in C_0$ tal que $x \subset x_0$. En general, supuesta construida $\{x_\delta\}_{\delta < \gamma}$, con $\gamma < \mu$, tomamos $x_\gamma \in C_\gamma$ tal que $\bigcup_{\delta < \gamma} x_\delta \subset x_\gamma$. Esto es posible porque la unión tiene cardinal menor que κ y C_γ no está acotado. De este modo, $x_\gamma \in C_\gamma \subset C_\delta$ para todo $\delta \geq \gamma$, luego $y = \bigcup_{\delta < \mu} x_\delta = \bigcup_{\gamma \leq \delta < \mu} x_\delta \in C_\gamma$, porque C_γ es cerrado, luego $x \subset y \in \bigcap_{\delta < \mu} C_\delta$, lo que prueba que la intersección no está acotada. ■

Definición B.3 Si $\{C_a\}_{a \in A}$ es una familia de subconjuntos de $\mathcal{P}_\kappa A$, definimos su *intersección diagonal* como

$$\triangle_{a \in A} C_a = \{X \in \mathcal{P}_\kappa A \mid X \in \bigcap_{a \in X} C_a\}.$$

Teorema B.4 La intersección diagonal de una familia de c.n.a.s es c.n.a.

DEMOSTRACIÓN: Sea $\{C_a\}_{a \in A}$ una familia de c.n.a.s y sea C su intersección diagonal. Sea $\{x_\delta\}_{\delta < \mu}$ una sucesión creciente de elementos de C y tomemos $a \in \bigcup_{\delta < \mu} x_\delta$. Sea $\gamma < \mu$ tal que $a \in x_\gamma$. Entonces, para todo $\gamma \leq \delta < \mu$, se cumple que $a \in x_\gamma \subset x_\delta \in C$, luego $x_\delta \in C_a$, luego

$$\bigcup_{\delta < \mu} x_\delta = \bigcup_{\gamma \leq \delta < \mu} x_\delta \in C_a,$$

porque C_a es cerrado, y esto prueba que está en C , luego C es cerrado.

Ahora tomamos $x \in \mathcal{P}_\kappa A$ y tomamos $x \subset x_0 \in \bigcap_{a \in x} C_a$, lo cual es posible porque la intersección es c.n.a., luego tomamos $x_0 \subset x_1 \in \bigcap_{a \in x_1} C_a$, y de este modo construimos una sucesión $\{x_n\}_{n \in \omega}$. Veamos que $x \subset y = \bigcup_{n \in \omega} x_n \in C$.

En efecto, si $a \in y$, existe un $m \in \omega$ tal que $a \in x_m$, luego para todo $n > m$ se cumple que $a \in x_{n-1} \subset x_n \in \bigcap_{a \in x_{n-1}} C_a$, luego $x_n \in C_a$, luego

$$y = \bigcup_{m < n \in \omega} x_n \in C_a,$$

porque C_a es cerrado, y esto prueba que $y \in C$, luego C no está acotado. ■

Conviene observar que los conjuntos cerrados cumplen una propiedad de clausura más general que la que exige la definición. Para ello necesitamos el concepto siguiente:

Definición B.5 *Se dice que un conjunto D es dirigido si*

$$\bigwedge xy \in D \forall z \in D (x \subset z \wedge y \subset z).$$

Teorema B.6 *Si C es cerrado y $D \subset C$ es un conjunto dirigido tal que $|D| < \kappa$, entonces $\bigcup D \in C$.*

DEMOSTRACIÓN: Observemos en primer lugar que si D es un conjunto dirigido y $X \subset D$, existe un conjunto dirigido D_0 tal que $X \subset D_0 \subset D$ y $|D_0| \leq \aleph_0 |X|$. En efecto, podemos tomar una función $f : D \times D \rightarrow D$ que cumpla $\bigwedge xy \in D x \cup y \subset f(x, y)$, y a partir de ella definimos

$$X_0 = X, \quad X_{n+1} = f[X_n \times X_n], \quad D_0 = \bigcup_{n \in \omega} X_n.$$

Si el teorema es falso, existe un $D \subset C$ dirigido tal que $|D| < \kappa$ pero $\bigcup D \notin C$. Podemos tomarlo del menor cardinal posible $\mu < \kappa$, que será infinito, porque claramente un conjunto dirigido finito tiene máximo. Sea $\{d_\alpha\}_{\alpha < \mu}$ una enumeración de D . Podemos construir recurrentemente una sucesión creciente $\{D_\alpha\}_{\alpha < \mu}$ de subconjuntos dirigidos de D de cardinal $< \mu$ tal que $d_\alpha \in D_\alpha$.

En efecto, basta tomar como D_α un conjunto dirigido de cardinal $< \mu$ que contenga a $\bigcup_{\delta < \alpha} D_\delta \cup \{d_\alpha\}$. Por la minimalidad de μ tenemos que $\bigcup D_\delta \in C$ y estas uniones forman una sucesión creciente, luego $\bigcup D = \bigcup_{\delta < \mu} \bigcup D_\delta \in C$, contradicción. ■

Definición B.7 Si $f : \mathcal{P}^f A \rightarrow \mathcal{P}_\kappa A$, definimos

$$\text{cl } f = \{X \in \mathcal{P}_\kappa A \mid \bigwedge x \in \mathcal{P}^f X f(x) \subset X\}.$$

Teorema B.8 *Si $f : \mathcal{P}^f A \rightarrow \mathcal{P}_\kappa A$ entonces $\text{cl } f$ es c.n.a. y si C es c.n.a. existe $f : \mathcal{P}^f A \rightarrow \mathcal{P}_\kappa A$ tal que $\text{cl } f \subset C$.*

DEMOSTRACIÓN: Sea $\{X_\delta\}_{\delta < \mu}$ una sucesión creciente en $\text{cl } f$, con $\mu < \kappa$ infinito. Si $x \subset \bigcup_{\delta < \mu} X_\delta$ es finito, existe un $\delta < \mu$ tal que $x \subset X_\delta$, y entonces $f(x) \subset X_\delta \subset \bigcup_{\delta < \mu} X_\delta$, luego la unión está en $\text{cl } f$, que es, por tanto, cerrada.

Tomemos ahora $X \in \mathcal{P}_\kappa A$ y definamos una sucesión $\{X_n\}_{n \in \omega}$ como sigue:

$$X_0 = X, \quad X_{n+1} = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X_n} f(x), \quad Y = \bigcup_{n \in \omega} X_n.$$

Es claro entonces que $|Y| < \kappa$ y si $x \subset Y$ finito, existe un n tal que $x \subset X_n$, luego $f(x) \subset X_{n+1} \subset Y$, luego $Y \in \text{cl } f$, que es, por tanto, acotada.

Tomemos ahora un c.n.a. arbitrario C . Definimos $f : \mathcal{P}^f A \rightarrow C$ por recurrencia sobre $|x|$. Elegimos $f(\emptyset)$ arbitrariamente y si tenemos f definida para conjuntos de cardinal n y $|x| = n + 1$, definimos $f(x) \in C$ de modo que

$$x \cup \bigcup_{a \in x} f(x \setminus \{a\}) \subset f(x),$$

lo cual es posible porque C no está acotado. Observemos que esta construcción garantiza que si $x \subset y$, entonces $f(x) \subset f(y)$, por lo que $\{f(x) \mid x \in \mathcal{P}^f A\}$ es un subconjunto dirigido de C . Además, si $X \in \text{cl } f$, tenemos que

$$X = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X} x \subset \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X} f(x) \subset X,$$

luego $X = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X} f(x) \in C$, por el teorema B.6. Esto prueba que $\text{cl } f \subset C$. ■

Definición B.9 Llamaremos

$$\mathcal{D}_\kappa A = \{X \subset \mathcal{P}_\kappa A \mid \forall C \subset \mathcal{P}_\kappa A (C \text{ es c.n.a.} \wedge C \subset X)\}.$$

El teorema B.2 implica que $\mathcal{D}_\kappa A$ es un filtro κ -completo, el teorema B.4 nos da que es cerrado para intersecciones diagonales y B.6 implica que está generado por los conjuntos de la forma $\text{cl } f$, con $f : \mathcal{P}^f A \rightarrow \mathcal{P}_\kappa A$.

Un conjunto $E \subset \mathcal{P}_\kappa A$ es *estacionario* si corta a todo c.n.a. o, equivalentemente, a todo elemento de $\mathcal{D}_\kappa A$, o también si $\mathcal{P}_\kappa A \setminus E \notin \mathcal{D}_\kappa A$.

Una aplicación $f : D \subset \mathcal{P}_\kappa A \rightarrow A$ es *regresiva* si

$$\bigwedge x \in D (x \neq \emptyset \rightarrow f(x) \in x).$$

Así, pues, en este contexto las aplicaciones regresivas (análogas a las definidas en [TC 6.14]) son simplemente las funciones de elección. Vamos a probar un análogo parcial de [TC 6.15]:

Teorema B.10 *Si $E \subset \mathcal{P}_\kappa A$ es estacionario y $f : E \rightarrow A$ es regresiva, entonces existe un $a \in A$ tal que $\{x \in E \mid f(x) = a\}$ es estacionario.*

DEMOSTRACIÓN: En caso contrario, para cada $a \in A$ existe un c.n.a. C_a disjunto con $E_a = \{x \in E \mid f(x) = a\}$ y podríamos formar el c.n.a. $C = \bigtriangleup_{a \in A} C_a$.

Como E es estacionario existe $x \in E \cap C$. Sea $a = f(x) \in x$, de modo que $x \in C_a \cap E_a$, contradicción. ■

Teorema B.11 *Supongamos que $A \subset B$. Si $P \in \mathcal{D}_\kappa B$, entonces*

$$P_A = \{X \cap A \mid X \in P\} \in \mathcal{D}_\kappa A.$$

DEMOSTRACIÓN: Existe $f : \mathcal{P}^f B \longrightarrow \mathcal{P}_\kappa B$ tal que $\text{cl } f \subset P$. Para cada $X \subset \mathcal{P}_\kappa B$ definimos

$$X_0 = X, \quad X_{n+1} = X_n \cup \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X_n} f(x), \quad \text{cl}_f(X) = \bigcup_{n \in \omega} X_n.$$

Es claro entonces que $\text{cl}_f(X)$ es el menor elemento de $\text{cl } f$ que contiene a X . Observemos que

$$\text{cl}_f(X) = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X} \text{cl}_f(x),$$

pues claramente, si llamamos U al miembro derecho, $X \subset U \subset \text{cl}_f(X)$, y además $U \in \text{cl } f$, pues si $u \in \mathcal{P}^f U$, teniendo en cuenta que $\text{cl}_f(x) \cup \text{cl}_f(y) \subset \text{cl}_f(x \cup y)$, existe un $x \in \mathcal{P}^f(X)$ tal que $u \subset \text{cl}_f(x)$, y entonces $f(u) \subset \text{cl}_f(x) \subset U$. Esto nos da la igualdad.

Definimos $g : \mathcal{P}^f A \longrightarrow \mathcal{P}_\kappa A$ mediante $g(x) = \text{cl}_f(x) \cap A$. Así, si $X \in \text{cl } g$, se cumple que

$$X \subset \text{cl}_f(X) \cap A = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X} \text{cl}_f(x) \cap A = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f X} g(x) \subset X,$$

luego $X = \text{cl}_f(X) \cap A$. Además $\text{cl}_f(X) \in \text{cl } f$, luego

$$\text{cl } g \subset \{X \cap A \mid X \in \text{cl } f\} \subset \{X \cap A \mid X \in P\}. \quad ■$$

Ejercicio: Si $A \subset B$ y C es c.n.a. en $P_\kappa A$, entonces $C^B = \{X \in \mathcal{P}_\kappa B \mid X \cap A \in C\}$ es c.n.a. en $\mathcal{P}_\kappa B$. Por consiguiente, si $P \in \mathcal{D}_\kappa A$, entonces $P^B \in \mathcal{D}_\kappa B$.

B.2 Subconjuntos de $\mathcal{P}_{\aleph_1}^\alpha A$

Finalmente vamos a generalizar los conceptos y resultados de las secciones anteriores a un contexto menos habitual, pero que resulta necesario en el capítulo X para caracterizar los c.p.o.s α -proprios. Por simplicidad nos limitaremos al caso $\kappa = \aleph_1$. Trabajaremos con un conjunto no numerable A y un ordinal numerable $\alpha > 0$.

Definición B.12 Sea A un conjunto no numerable y α un ordinal numerable. Definimos $\mathcal{P}_{\aleph_1}^\alpha A$ como el conjunto de todas las sucesiones $\{a_\delta\}_{\delta < \alpha}$ que cumplen las propiedades siguientes:

- a) Cada $a_\delta \in \mathcal{P}_{\aleph_1} A$.
- b) Si $\delta < \epsilon < \alpha$, entonces $a_\delta \subset a_\epsilon$.
- c) Si $\lambda < \alpha$ es un ordinal límite, entonces $a_\lambda = \bigcup_{\delta < \lambda} a_\delta$.

En lo sucesivo escribiremos $\mathcal{P}^\alpha A$ en lugar de $\mathcal{P}_{\aleph_1}^\alpha A$. Notemos que, en particular, podemos identificar $\mathcal{P}^1(A) = \mathcal{P}_{\aleph_1} A$.

Definimos $\mathcal{F}^\alpha(A)$ como el conjunto de todas las funciones

$$F : \bigcup_{\beta < \alpha} \mathcal{P}^\beta(A) \times \mathcal{P}^f A \longrightarrow \mathcal{P}^1 A.$$

Diremos que $a \in \mathcal{P}^\alpha A$ es *cerrada* para F si para todo $\beta < \alpha$ que no sea un ordinal límite y cada $x \in \mathcal{P}^f a_\beta$, se cumple $F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) \subset a_\beta$.

Llamamos $G(F)$ al conjunto de todos los elementos de $\mathcal{P}^\alpha A$ cerrados para F . Notemos que $G(F) \neq \emptyset$, pues podemos definir $a \in G(F)$ como sigue:

Supuesto definido $\{a_\delta\}_{\delta < \gamma}$, con $\gamma < \alpha$, que cumpla la definición de sucesión cerrada para $\beta < \gamma$, si $\beta = 0$ o $\beta = \delta + 1$ definimos como sigue a_β :

$$a_\beta^0 = \begin{cases} \emptyset & \text{si } \beta = 0, \\ a_\delta & \text{si } \beta = \delta + 1, \end{cases} \quad a_\beta^{k+1} = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f a_\beta^k} F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x), \quad a_\beta = \bigcup_{k < \omega} a_\beta^k.$$

Claramente la prolongación $\{a_\delta\}_{\delta < \beta+1}$ sigue cumpliendo la definición de sucesión cerrada. Si β es un límite definimos simplemente a_β según la tercera condición de la definición de $\mathcal{P}^\alpha A$. Es obvio que la sucesión obtenida de este modo está en $G(F)$.

Si $\{F_n\}_{n < \omega}$ son funciones de $\mathcal{F}^\alpha(A)$, se cumple que $\bigcap_{n < \omega} G(F_n) \neq \emptyset$, pues basta tomar $F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) = \bigcup_{n < \omega} F_n(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x)$. Es inmediato comprobar que $\emptyset \neq G(F) \subset \bigcap_{n < \omega} G(F_n)$.

Definición B.13 Si A es un conjunto no numerable y $\alpha > 0$ es un ordinal numerable, definimos $\mathcal{D}^\alpha A [= \mathcal{D}_{\aleph_1}^\alpha(A)]$ como el conjunto de todos los subconjuntos de $\mathcal{P}^\alpha A$ que contienen un conjunto $G(F)$, para cierta $F \in \mathcal{F}^\alpha(A)$.

Las observaciones precedentes muestran que $\mathcal{D}^\alpha(A)$ es un filtro \aleph_1 -completo en $\mathcal{P}^\alpha A$. Diremos que $E \subset \mathcal{P}^\alpha A$ es *estacionario* si $\mathcal{P}^\alpha A \setminus E \notin \mathcal{D}^\alpha A$.

Observemos que el filtro $\mathcal{D}^1 A$ puede identificarse con el filtro $\mathcal{D}_{\aleph_1} A$ definido en la sección precedente. En efecto, si $\alpha = 1$ los elementos de $\mathcal{F}^1(A)$ son funciones $F : \{\emptyset\} \times \mathcal{P}^f A \longrightarrow \mathcal{P}^1 A$, que pueden identificarse con funciones $f : \mathcal{P}^f A \longrightarrow \mathcal{P}_{\aleph_1} A$, y entonces $G(f) = \text{cl } f$. Por lo tanto, $\mathcal{D}^1 A$ está formado por los subconjuntos de $\mathcal{P}_{\aleph_1} A$ que contienen a algún $\text{cl } f$, y eso es precisamente $\mathcal{D}_{\aleph_1} A$. Por lo tanto, la noción de conjunto estacionario también coincide en este caso con la que teníamos definida.

Teorema B.14 *Sea A un conjunto no numerable, $\alpha > 0$ un ordinal no numerable y $E \subset \mathcal{P}^\alpha A$ estacionario. Si $g : E \rightarrow A$ es una función tal que si $a \in E$ cumple $a_0 \neq \emptyset$, entonces $g(a) \in a_0$, entonces existe un $u \in A$ tal que $E_u = \{a \in E \mid g(a) = u\}$ es estacionario.*

DEMOSTRACIÓN: Observemos que $C = \{a \in \mathcal{P}^\alpha A \mid a_0 \neq \emptyset\} \in \mathcal{D}^\alpha A$ (pues cualquier $F \in \mathcal{F}^\alpha(A)$ que cumpla $F(\emptyset, \emptyset) \neq \emptyset$ cumple $G(F) \subset C$), por lo que $E' = C \cap E$ es estacionario y basta probar que algún E'_u es estacionario, ya que $E'_u \subset E_u$. Equivalentemente, podemos suponer que todo $a \in E$ cumple $a_0 \neq \emptyset$.

Si ningún E_u es estacionario, para cada $u \in A$ existe una función $F_u \in \mathcal{F}^\alpha(A)$ tal que $G(F_u) \cap E_u = \emptyset$. Llamemos $f_u : \mathcal{P}^f A \rightarrow \mathcal{P}^1 A$ a la función dada por $f_u(x) = F(\emptyset, x)$. Entonces $C = \bigtriangleup_{u \in A} \text{cl } f_u$ es c.n.a. en $\mathcal{P}^1 A$, luego existe una función $f : \mathcal{P}^f A \rightarrow \mathcal{P}^1 A$ tal que $\text{cl } f \subset C$.

Definimos como sigue una función $F \in \mathcal{F}^\alpha(A)$:

$$F(\emptyset, x) = f(x), \quad F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) = \bigcup_{u \in a_0} F_u(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x),$$

donde la segunda parte vale cuando $\beta \neq 0$. Como E es estacionario existe $a \in G(F) \cap E$. Sea $u = g(a) \in a_0$, puesto que sabemos que $a_0 \neq \emptyset$. Vamos a probar que $a \in G(F_u) \cap E_u$, con lo que tendremos una contradicción. En efecto, si $x \in \mathcal{P}^f a_0$, tenemos que $f(x) = F(\emptyset, x) \subset a_0$, luego $a_0 \in \text{cl } f \subset C$ y, como $u \in a_0$, esto implica que $a_0 \in \text{cl } f_u$, luego si $x \in \mathcal{P}^f a_0$ se cumple que $F_u(\emptyset, x) = f_u(x) \subset a_0$.

Si β es un ordinal sucesor y $x \in \mathcal{P}^f a_\beta$, usando de nuevo que $u \in a_0$, vemos que $F_u(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) \subset F(\{a_\delta\}_{\delta < \beta}, x) \subset a_\beta$, luego, en efecto, $a \in G(F)$. ■

Teorema B.15 *Si $A \subset B$ son conjuntos no numerables, $\alpha > 0$ es un ordinal numerable y $P \in \mathcal{D}^\alpha B$, entonces*

$$P_A = \{\{a_\delta \cap A\}_{\delta < \alpha} \mid a \in P\} \in \mathcal{D}^\alpha A.$$

DEMOSTRACIÓN: Tomemos $F \in \mathcal{F}^\alpha B$ tal que $G(F) \subset P$. En la prueba del teorema B.11 hemos definido la clausura de un elemento de $\mathcal{P}^1 B$ respecto de una aplicación $f : \mathcal{P}^f B \rightarrow \mathcal{P}^1 B$. Ahora generalizamos como sigue dicha definición: dado $a \in \mathcal{P}^\alpha B$, definimos como sigue $\bar{a}^F \in \mathcal{P}^\alpha B$:

$$\begin{aligned} \bar{a}_0^F &= \text{cl}_{f_0} a_0, \quad \text{donde } f_0(x) = F(\emptyset, x), \\ \bar{a}_{\beta+1}^F &= \text{cl}_{f_{\beta+1}}(\bar{a}_\beta^F \cup a_{\beta+1}), \quad \text{donde } f_{\beta+1}(x) = F(\{\bar{a}_\delta^F\}_{\delta < \beta+1}, x), \\ \bar{a}_\lambda^F &= \bigcup_{\delta < \lambda} \bar{a}_\delta^F. \end{aligned}$$

Es claro entonces que $\bar{a}^F \in G(F)$ y que $\bigwedge \delta < \alpha \ a_\delta \subset \bar{a}_\delta^F$. Definimos $H \in \mathcal{F}^\alpha A$ de modo que

$$H(\emptyset, x) = \text{cl}_{f_0} x \cap A, \quad H(\{a_\delta\}_{\delta < \beta+1}, x) = \text{cl}_{f_{\beta+1}}(\bar{a}_\beta^F \cup x) \cap A,$$

donde f_0 y $f_{\beta+1}$ tienen el mismo significado que en la definición de \bar{a}^F . Basta probar que $G(H) \subset \{\{a_\delta \cap A\}_{\delta < \alpha} \mid a \in G(F)\} \subset P_A$.

Tomamos, pues, $a \in G(H)$, de modo que $\bar{a}^F \in G(F)$, y basta probar que para todo $\delta < \alpha$ se cumple que $a_\delta = \bar{a}_\delta^F \cap A$. En efecto,

$$a_0 \subset \bar{a}_0^F \cap A = \text{cl}_{f_0} a_0 \cap A = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f a_0} \text{cl}_{f_0} x \cap A = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f a_0} H(\emptyset, x) \subset a_0.$$

Similarmente,

$$\begin{aligned} a_{\beta+1} \subset \bar{a}_{\beta+1}^F \cap A &= \text{cl}_{f_{\beta+1}} (\bar{a}_\beta^F \cup a_{\beta+1}) \cap A = \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f a_{\beta+1}} \text{cl}_{f_{\beta+1}} (\bar{a}_\beta^F \cup x) \cap A \\ &= \bigcup_{x \in \mathcal{P}^f a_{\beta+1}} H(\{\bar{a}_\delta^F\}_{\delta < \beta+1}, x) \subset a_{\beta+1}, \end{aligned}$$

y si $\lambda < \alpha$ es un ordinal límite y la igualdad es cierta para todo $\delta < \lambda$,

$$\bar{a}_\lambda^F \cap A = \bigcup_{\delta < \lambda} \bar{a}_\delta^F \cap A = \bigcup_{\delta < \lambda} a_\delta = a_\lambda.$$

■

Bibliografía

- [1] ABRAHAM, U. *Proper Forcing*, en [6].
- [2] ABRAHAM, U. y SHELAH, S. A Δ_2^2 Well Order of the Reals and Incompactness of $L(Q^{MM})$, *Annals of Pure and Applied Logic* 59 (1) (1993) 1–32
- [3] BARWISE, J. (editor) *Handbook of Mathematical Logic*, North Holland, Amsterdam, 1977.
- [4] DEVLIN, K.J. *Constructibility*, Springer, Berlín, 1984.
- [5] FELGNER, U., *Models of ZF-Set Theory*, Springer, Berlin, 1971
- [6] FOREMAN, M. y KANAMORI, A. (editores) *Handbook of Set Theory*, Springer, Berlín 2010.
- [7] FRANKIEWICZ, R. y ZBIERSKI, P. *Hausdorff Gaps and Limits*, North Holland, Amsterdam, 1994.
- [8] Fuchino, S. *Open Coloring Axiom and Forcing Axioms*. Preprint.
- [9] GOLDSTERN, M. *Tools for your forcing construction*, Israel Mathematical Conference Proceedings, Vol. 106 (1992), pp. 307–362.
- [10] HALBEISEN, L.J. *Combinatorial Set Theory, with a gentle introduction to forcing*, Springer Berlín (2012).
- [11] HALPERN, D., LÄUCHLI, H. *A partition theorem*. Trans. Am. Math. Soc. **124**, (1966) 360–367.
- [12] HALPERN, D., LÉVY, A. *The Boolean prime ideal theorem does not imply the axiom of choice*, *Axiomatic set theory*, Proc. Symp. Pure Math., Univ. of California, Los Angeles, D. Scott (ed), **13** (1), 83–134, 1971.
- [13] JECH, T.J. *The Axiom of Choice*, North Holand, Amsterdam, 1973.
- [14] — *Set Theory*, Academic Press, New York, 1978.
- [15] — *Set Theory, The Third Millennium Edition, revised and expanded* Springer, 2000.

- [16] — *Stationary sets*, en [6].
- [17] JUDAH, H., JUST, W., WOODIN, H. (editores) *Set Theory of the Continuum* Springer, New York, 1992.
- [18] KUNEN, K. *Combinatorics*, en [3].
- [19] — *Set Theory. An Introduction to Independence Proofs*, North Holland, Amsterdam, 1985.
- [20] KUNEN, K. y VAUGHAN, J.E. (editores) *Handbook of Set-Theoretic Topology*, North Holland, Amsterdam, 1984.
- [21] SHELAH, S. *Proper and Improper Forcing*, Springer, Berlín, 1998.
- [22] VAN DOUWEN, E.K. *The Integers and Topology*, en [20].
- [23] VELICKOVIC, B. *Applications of the open coloring axiom*, en [17].
- [24] WOHOFSKY, W. *On the existence of p-points and other ultrafilters in the Stone-Čech compactification of \mathbb{N}* . Diploma Thesis, Vienna University of Technology, Viena, 2008.

Índice de Materias

- absoluta (expresión), 25
- anticadena, 161
- aproximación, 433
- asignación, 256
- atómico (c.p.o.), 130
- átomo
 - en un c.p.o., 130
- automorfismo, 150
- Axioma de las coloraciones abiertas (ACA), 348
- buen nombre, 169
- casi homogéneo, 151
- cerrado, 162
- cerrado (conjunto), 463
- colapso transitivo, 42
- coloración, 347
- compatibilidad, 126
- completamente propio, 395
- completo (c.p.o), 397
- condición, 125
- condición de cadena, 161
- conjugado, 220
- conjunto
 - hereditariamente simétrico, 221
 - simétrico, 220, 230
- conjunto preordenado, 125
- conservación
 - de cardinales, 160
 - de cofinalidades, 160
- constructibilidad
 - relativa, 209
- constructible (conjunto), 70
- cuasidisjunta (familia), 164
- definible, 91
- definible (conjunto)
 - por ordinales, 198
 - hereditariamente, 202
 - por sucesiones de ordinales, 200
- denso, 127, 129
- dirigido (conjunto), 465
- Easton
 - función de, 178
 - producto, 178
- escala, 325
- especial (árbol de Aronszajn), 317
- estabilizador, 224
- estacionario (conjunto), 466, 468
- extensión
 - genérica, 133
 - simétrica, 230
- extensional (relación), 43
- filtro, 126
 - de subgrupos, 220
 - genérico, 127
- genérica (condición), 375
- genérico
 - filtro, 127
 - ultrafiltro, 121
- grupo de simetrías, 219, 229
- hereditariamente
 - simétrico (conjunto), 221
 - simétrico (nombre), 229
- homogéneo (conjunto), 347
- hueco, 336
- incompatibilidad, 126
- inmersión, 138
 - completa, 138

- densa, 139
- isomorfismo de modelos, 41
- iteración de preórdenes, 298
- Kripke-Platek (KP), 4
- Lévy
 - orden colapsante de, 186
- Lema de los sistemas Δ , 164
- Martin (axioma de), 305
- modelo ω , 61
- modelo (natural, transitivo, interno),
 - 24
- Mostowski (función colapsante de),
 - 42
- no atómico (c.p.o.), 130
- nombre, 132
 - bueno, 169
 - canónico, 133
 - para un c.p.o., 289
- p-punto, 331
- parte bien fundada de un modelo,
 - 54
- partes definibles, 66
- predenso, 374
- producto
 - de c.p.o.s, 175
 - generalizado, 289
 - de Easton, 178
- promesa, 434
- propio, 376, 378
 - completamente, 395
 - sobre isomorfismos, 406
- reducción, 138
- regresiva (aplicación), 466
- relación definible, 65
- relativización, 20
- requisito, 433
- restricción, 295
- sección, 336
- semejanza, 139
- simétrico (conjunto), 220
- simétrico (nombre), 229
- sistema de completitud, 397
- sistema delta, 164
- situación normal, 405
- soporte, 224, 298
 - de un conjunto, 262
 - de un nombre, 253, 254
 - de una condición, 255
- Teorema
 - de Baire, 315
 - de Easton, 183
 - de la forma normal, 105
 - de reflexión, 40, 45
 - del modelo genérico, 147
 - del producto, 176
 - fundamental de la teoría de extensiones, 122, 142, 460, 461
- valor, 132
- Zermelo-Fraenkel (ZF), 2