



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

UN ESTUDIO ELEMENTAL SOBRE LOS ESPACIOS DE  
ISBELL-MRÓWKA

# T E S I S

Que para obtener el título en:  
**MATEMÁTICAS**

P R E S E N T A:

Hugo Víctor García Martínez

A S E S O R:

Dr. Fidel Casarrubias Segura



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2025



*AAAAA.*  
- DDD.



# Agradecimientos

  Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

  Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.



# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>ix</b>
<b>0 Preliminares</b>	<b>1</b>
0.1 Conjuntos . . . . .	1
0.2 Topología . . . . .	1
<b>1 Familias casi ajena</b> s	<b>3</b>
1.1 Observaciones inmediatas . . . . .	3
1.2 Familias casi ajena de tamaño $\mathfrak{c}$ . . . . .	8
1.3 El ideal generado y su comportamiento . . . . .	11
1.4 Resultados en combinatoria infinita . . . . .	16
1.4.1 Teorema de Simon . . . . .	16
1.4.2 Grietas y familias de Luzin . . . . .	18
1.4.3 Lema de Solovay . . . . .	24
<b>2 Espacios de Isbell-Mrówka</b>	<b>29</b>
2.1 $\Psi$ -espacios y caracterizaciones elementales . . . . .	29
2.2 Compacidad y compacidad local . . . . .	35
2.3 Metrizabilidad y Pseudocompacidad . . . . .	37
2.4 Teorema de Kannan y Rajagopalan . . . . .	41
<b>3 El compacto de Franklin</b>	<b>51</b>
3.1 Sucesiones en $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ . . . . .	51
3.2 La propiedad de Fréchet . . . . .	57
<b>4 Normalidad en los espacios de Mrówka</b>	<b>61</b>
4.1 Independencia de la Conjetura Débil de Moore . . . . .	61
4.1.1 Consistencia de WMC . . . . .	64

4.1.2	Consistencia de $\neg$ WMC . . . . .	70
4.2	Equivalecia para la normalidad de $\Psi(\mathcal{A})$ bajo MA . . . . .	72
<b>Caracterizaciones</b>		<b>a</b>
<b>Índice Simbólico</b>		<b>c</b>
<b>Índice Alfabético</b>		<b>e</b>
<b>Referencias</b>		<b>g</b>

# Introducción

Corría el año de 1954 cuando Stanisaw G. Mrówka (1933-2010); “hijo” doctoral de Kazimierz Kuratowski, introdujo en su artículo **On completely regular spaces** un ejemplo de espacio topológico de Tychonoff, pseudocompacto, pero no compacto; su construcción parte de una familia de subconjuntos de  $\omega$  con características especiales. Este avance teórico es considerado un antecedente temprano de los hoy conocidos como *espacios de Isbell-Mrówka*; espacios cuyo nombre hace honor tanto al propio Stanisaw Mrówka, como a John R. Isbell (1930-2005); quienes, durante la década de los sesenta le dieron forma al concepto y mostraron por qué tales espacios son dignos de poseer gran interés dentro de la topología general.

Cada espacio de Isbell-Mrówka es de Tychonoff, de Moore y cero-dimensional; además, la razón por la que el ejemplo dado por Mrówka en 1954 es considerado como el antecesor de estos espacios es porque cada uno de ellos determinado (biunívocamente) por una *familia casi ajena*, un tipo especial de familia de subconjuntos de  $\omega$ . Tal correspondencia es la responsable de que se puedan “codificar” sus propiedades topológicas en términos de las propiedades que tienen las familias casi ajenas como conjuntos. La idea del presente documento es dar un primer acercamiento al estudio de estos espacios, para lo cual es necesario dar un panorama general sobre qué son las familias casi ajenas y cómo se comportan; explicar exactamente cuáles son estas “codificaciones” y exhibir algunos de los métodos para conseguirlas.

Este trabajo se divide en dos grandes secciones; el estudio de las familias casi ajenas (Capítulo 1), lo que se puede tomar como la parte “conjuntista” del escrito; y, su contraparte topológica, el estudio de los espacios de Isbell-Mrówka (Capítulos 2-4). En el Capítulo 1 se presentarán construcciones clásicas de familias casi ajenas y se expondrá la teoría básica sobre su combinatoria infinita asociada: Teorema de Simon, familias de Luzin y el Lema de Solovay. El Capítulo

2 tiene por objetivo presentar el Teorema de Kannan y Rajagopalan; una caracterización por propiedades topológicas de los espacios de Isbell-Mrówka, aquí, el entendimiento del comportamiento esencial de estos espacios es clave, así que este también será un aspecto central del capítulo. Los Capítulos 3 y 4 abordan problemas específicos que son testigo de la versatilidad de los objetos de estudio de esta tesis; en el Capítulo 3 se exhibirá la relación que hay entre la propiedad de Fréchet y la compactación unipuntual de los espacios de Isbell-Mrówka (el compacto de Franklin); y, en el Capítulo 4, se estudiarán en detalle los aspectos primordiales para poder “codificar” la propiedad topológica de normalidad, presentando principalmente los resultados de Silver y Tall.

Se dará por hecho que el lector de este documento tiene conocimientos elementales tanto de la teoría axiomática (usual) de conjuntos, ZFC; así como de topología general.

# 0 Preliminares

## 0.1. Conjuntos

1. Convención sobre las notaciones “no estándar” (potencia, colecciones  $[A]^{\geq\kappa}$ , etcétera)
2. Naturales, ordinales y cardinales.
3. Inducción y Recursión más allá de  $\omega$  (?)
4. Órdenes parciales y sus elementos distinguidos, árboles.
5. Casi contención y el comportamiento básico de la misma.

## 0.2. Topología

1. Espacios topológicos, bases, axiomas de numerabilidad. Definición sucinta de los términos: peso, carácter
2. Convenciones sobre las notaciones para producto, suma, homeomorfismos, encajes, y esclarecimiento de los los términos: propiedades topológicas, productivas, factorizables, etc...
3. Axiomas de separación (desde  $T_0$  a  $T_4$ , normalidad, regularidad, regularidad completa y normalidad).
4. Espacios cero dimensionales y su caracterización.

5. Convergencia de sucesiones, espacios de Fréchet y secuenciales. Convención de términos como: sucesiones convergentes, clausura secuencial, etcétera.
6. Compacidad y sus “variantes”: compacidad numerable, Lindelöf, compacidad secuencial, pseudocompacidad, compacidad local, etc...
7. Metrizabilidad: se conviene de forma breve lo que es una métrica (y métrica completa ?), un espacio metrizable (y completamente metrizable ?). Se enuncian teoremas de equivalencia para: su separabilidad; y, su compacidad.
8. Metrización: Se enuncian los teoremas de metrización de: Urysohn, Bing y Arhangelskii.
9. Categoría de Baire, se define el concepto de espacio de Baire y se enuncia el teorema de Categoría de Baire para: espacios de Hausdorff y localmente compactos; y, espacios completamente metrizable.

# 1 Familias casi ajena

Las familias casi ajena («almost disjoint families», en inglés) son objetos fascinantes de la teoría de conjuntos; como se verá a lo largo de este trabajo, sus aplicaciones no sólo se limitan a esta rama de las matemáticas, sino que sus repercusiones se extienden a la topología. Entre los pioneros de su estudio destacan enormes personajes, entre ellos Felix Hausdorff, Wacaw Sierpiski, Kazimierz Kuratowski, Eduard ech y Stefan Banach.

En lo que sigue, se presentarán estos objetos y se expondrán sus propiedades más inmediatas; algunos métodos para su construcción; y finalmente, un estudio básico sobre su combinatoria. A lo largo de esta última sección, se abordarán las pruebas de algunos resultados clásicos, principalmente: los Lemas de Dokálková y de Solovay, el Teorema de Simon y la existencia de las familias de Luzin. Por último, se darán algunas aplicaciones de esta teoría sobre el comportamiento de los cardinales  $\mathfrak{c}$ ,  $\mathfrak{m}$  y  $\mathfrak{a}$ .

## 1.1. Observaciones inmediatas

**Definición 1.1.1.** Sea  $N$  un conjunto numerable. Una **familia casi ajena** sobre  $N$  es un subconjunto  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$  cuyos elementos son casi ajenos por pares.  $\text{AD}(N)$  es el conjunto de todas las familias casi ajenas sobre  $N$ .

El término **familia casi ajena** (o simplemente **familia**) hará referencia a una familia casi ajena sobre  $\omega$ .

El concepto previo es fácilmente generalizable, el lector puede indagar al respecto en [4, Def. 9.20, p. 118]. Sin embargo, la teoría asociada a las familias casi ajenas, definidas como en 1.1.1, es suficientemente amplia y meritoria de un estudio dedicado.

Cualquier familia de subconjuntos ajenos por pares de  $N$ , es también una familia casi ajena sobre  $N$ ; particularmente,  $\emptyset$  y cualquier colección de la forma

$\{A\}$ , con  $A \in [N]^\omega$ . Además, resulta evidente que cada subconjunto de una familia casi ajena sobre  $N$  es, a su vez, una familia casi ajena sobre  $N$ .

Es claro que toda familia casi ajena tiene tamaño menor o igual a  $\mathfrak{c}$ ; así que en virtud de lo previamente observado, de existir alguna de ellas de tamaño el continuo, se garantizaría la existencia de familias ajenas de cualquier tamaño inferior a  $\mathfrak{c}$ .

**Ejemplo 1.1.2.** *Las siguientes colecciones:  $\{\omega\}$ ,  $\{\{2n \mid n \in \omega\}, \{2n+1 \mid n \in \omega\}\}$  y  $\{\{p^n \mid n \in \omega \setminus \{0\}\} \mid p \text{ es primo}\}$  son familias casi ajenas sobre  $\omega$ .*

No resulta muy difícil verificar que las primeras dos familias del ejemplo anterior son «grandes», en el siguiente sentido:

**Definición 1.1.3.** *Sea  $N$  conjunto numerable. Una familia  $\mathcal{A}$  sobre  $N$  es **maximal en  $N$**  si es  $\subseteq$ -maximal del conjunto  $\text{AD}(N)$ . Se denotará por  $\text{MAD}(N)$  al conjunto de todas ellas.*

*Cuando no haya riesgo de ambigüedad, el término **familia maximal** hará referencia a una familia maximal en  $\omega$ .*

Dado que los elementos de toda familia casi ajena son infinitos, se tiene inmediatamente la siguiente observación:

**Observación 1.1.4.** *Una familia  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$  es maximal en  $N$  si y sólo si se cumple cualquiera de las siguientes condiciones equivalentes:*

- i) *Para cualquier  $\mathcal{B} \subseteq [N]^\omega$ , si  $\mathcal{A} \subsetneq \mathcal{B}$ , entonces  $\mathcal{B} \notin \text{AD}(N)$ .*
- ii) *Para cada  $B \in [N]^\omega$  existe  $A \in \mathcal{A}$  tal que  $A \cap B$  es infinito.*

Se advierte que las familias sobre  $\omega$  parecerán deslucir a las construidas sobre otros conjuntos numerables; pero al no ser el estudio sobre estas últimas nulo, es menester considerar las propiedades que son transferibles entre estas dos clases de objetos.

**Definición 1.1.5.** Sean  $N, M$  conjuntos numerables y  $h : N \rightarrow M$  cualquier biyección. Se define  $\Phi_h : \mathcal{P}(\mathcal{P}(N)) \rightarrow \mathcal{P}(\mathcal{P}(M))$  como:

$$\Phi_h(\mathcal{A}) = \{h[A] \mid A \in \mathcal{A}\}.$$

En términos de lo recién definido, se remarca que al ser  $h$  biyección,  $\Phi_h$  será una biyección. Más aún, estas biyecciones se comportan bien respecto a ciertas virtudes conjuntistas, tal y como se ilustra a continuación.

**Proposición 1.1.6.** Sean  $N, M$  son numerables y  $h : N \rightarrow M$  una biyección cualquiera. Entonces:

- i)  $\mathcal{A} \subsetneq \mathcal{B}$  si y sólo si  $\Phi_h(\mathcal{A}) \subsetneq \Phi_h(\mathcal{B})$ .
- ii)  $\Phi_h(\mathcal{A} \cap \mathcal{B}) = \Phi_h(\mathcal{A}) \cap \Phi_h(\mathcal{B})$ .
- iii)  $\Phi_h(\mathcal{A} \cup \mathcal{B}) = \Phi_h(\mathcal{A}) \cup \Phi_h(\mathcal{B})$ .
- iv)  $|\mathcal{A}| = |\Phi_h(\mathcal{A})|$ .
- v)  $\Phi_h[\text{AD}(N)] = \text{AD}(M)$ .
- vi)  $\Phi_h[\text{MAD}(N)] = \text{MAD}(M)$

**Democión.** Se mostrarán únicamente (v) y (vi). En ambos basta probar la contención directa, pues al ser  $h$  biyección,  $\Phi_h^{-1} = \Phi_{h^{-1}}$ .

(v) Si  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$ , entonces  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$  y así  $\Phi_h(\mathcal{A}) \subseteq [M]^\omega$ . Ahora, si  $h[A], h[B] \in \Phi_h(\mathcal{A})$  son distintos, es necesario que  $A \neq B$  y por ello  $A \cap B =^* \emptyset$ . Se obtiene que  $h[A] \cap h[B] = h[A \cap B] =^* \emptyset$ , y con ello,  $\Phi_h(\mathcal{A}) \in \text{AD}(M)$ .

(vi) Si  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(N)$  y  $B \subseteq M$  es infinito, entonces  $h^{-1}[B] \subseteq N$  es infinito y existe  $A \in \mathcal{A}$  tal que  $A \cap h^{-1}[B]$  es infinito. Al ser  $h$  biyección,  $h[A \cap h^{-1}[B]] = h[A] \cap B$  es infinito, por ende  $\Phi_h(\mathcal{A}) \in \text{MAD}(M)$ . ■

A partir de este momento se consolida la usanza de hacer hincapié en qué propiedades, u objetos, basados en familias casi ajenas se preservan bajo las biyecciones  $\Phi_h$ .

Una aplicación superflua de lo anterior es el nacimiento de un método cómodo para generar familias casi ajenas; en especial, infinitas.

**Ejemplo 1.1.7.** Claramente  $\mathcal{A} = \{\{n\} \times \omega \mid n \in \omega\} \in \text{AD}(\omega \times \omega)$ . Así que si  $h : \omega \times \omega \rightarrow \omega$  es biyección,  $\Phi_h(\mathcal{A}) \in \text{AD}(\omega)$ . Más aún, tal familia es del mismo tamaño que  $\mathcal{A}$  (todo gracias a 1.1.6).

A continuación se comenzarán a examinar las propiedades de las familias casi ajenas maximales; se tiene la intención de responder a las preguntas que surgen naturalmente como: ¿puede haber familias casi ajenas más que numerables?, o, ¿existen familias maximales infinitas?

**Lema 1.1.8.** Si  $\mathcal{A}$  es familia casi ajena maximal, entonces  $\omega \subseteq^* \bigcup \mathcal{A}$ .

**Demostración.** Por contrapuesta, supóngase que  $B := \omega \setminus \bigcup \mathcal{A}$  es infinito. Si  $A \in \mathcal{A}$ , entonces  $A \subseteq \bigcup \mathcal{A}$ , y así  $A \cap B \subseteq A \setminus \bigcup \mathcal{A} \subseteq A \setminus A = \emptyset$ . Por lo que  $B \in [\omega]^\omega$  es casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ . ■

El recíproco del Lema previo falla para familias infinitas (véase la familia  $\Psi(\mathcal{A})$  del Ejemplo 1.1.7); y de hecho, no se cuenta un resultado «amigable» para determinar cuándo estas resultan ser maximales (véase 1.3.11). En contraparte a esto, se deduce rápidamente la siguiente equivalencia:

**Corolario 1.1.9.** Sea  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$ .  $\mathcal{A}$  es maximal si y sólo si  $\omega \subseteq^* \bigcup \mathcal{A}$ .

**Demostración.** Por el Lema previo, basta demostrar la necesidad.

Supóngase  $\omega \subseteq^* \bigcup \mathcal{A}$  y nótese que si  $B \in [\omega]^\omega$ , entonces  $B \subseteq^* \bigcup \mathcal{A}$  y con ello  $\emptyset \neq B \subseteq^* B \cap \bigcup \mathcal{A} = \bigcup \{B \cap A \mid A \in \mathcal{A}\}$ . Como la última es una unión finita,  $B$  debe tener intersección infinita con algún elemento de  $\mathcal{A}$ . ■

El posterior resultado puede ser visto como un símil al Teorema del Ultrafiltro (ver prelims), o bien, cualquier resultado afín en el que se haga uso del Principio de Maximalidad de Hausdorff o sus equivalentes (ver prelims).

**Lema 1.1.10.** *Toda familia casi ajena está contenida en una familia maximal.*

**Demuestra.** Sean  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$  y  $X$  el conjunto de todos las familias casi ajenas que contienen a  $\mathcal{A}$ . Como  $A \in X$ , por el Principio de Maximalidad de Hausdorff (AC), existe  $Y \subseteq X$ , una cadena  $\subseteq$ -maximal de  $(X, \subseteq)$ .

Defínase  $\mathcal{B} := \bigcup Y$ , como  $Y \subseteq \mathcal{P}([\omega]^\omega)$ , entonces  $\mathcal{B} \subseteq [\omega]^\omega$ . Además, si  $C, D \in \mathcal{B}$ , existen  $\mathcal{C}, \mathcal{D} \in Y \subseteq AD(\omega)$  con  $C \in \mathcal{C}$  y  $D \in \mathcal{D}$ . Puesto que  $Y$  es cadena de  $(X, \subseteq)$ , sin pérdida de generalidad,  $C, D \in \mathcal{D} \supseteq \mathcal{C}$ ; y con ello,  $C \cap D$  es finito, ya que  $\mathcal{D} \in Y \subseteq X \subseteq AD(\omega)$ . Luego  $\mathcal{B} \in AD(\omega)$ , y además,  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{B}$ .

Finalmente, si  $\mathcal{B}' \in AD(\omega)$  y  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{B}'$ , entonces  $Y \cup \{\mathcal{B}'\}$  es una cadena de  $(X, \subseteq)$ ; lo cual, junto a la maximalidad de  $Y$ , implica que  $\mathcal{B}' \in Y$  y  $\mathcal{B} = \mathcal{B}'$ . Por lo tanto,  $\mathcal{B} \in MAD(\omega)$ . ■

El siguiente resultado revela un fenómeno interesante respecto al tamaño de las familias maximales. Este se le atribuye a Wacaw Sierpiski (se desprende de [12, Teo. 2, p. 458]).

**Lema 1.1.11.** *Ninguna familia casi ajena numerable es maximal.*

**Demuestra.** Sea  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$  enumerada por  $\mathcal{A} = \{A_n \mid n \in \omega\}$ . Si  $n \in \omega$  es cualquiera,  $A_n \cap \bigcup \{A_m \mid m < n\} = \bigcup \{A_n \cap A_m \mid m < n\}$  es finito, al ser unión finita de conjuntos finitos. Luego, por ser  $A_n$  infinito,  $A_n \setminus \bigcup \{A_m \mid m < n\} = A_n \setminus (A_n \cap \bigcup \{A_m \mid m < n\})$  debe ser infinito; y particularmente, no vacío.

Considérese  $f : \omega \rightarrow \omega$  definida por  $f(n) = \min\{A_n \setminus \bigcup \{A_m \mid m < n\}\}$  para cada  $n$ . Resulta que  $f$  es inyectiva; si  $m < n$ , entonces  $f(n) \notin A_m$ ,  $f(m) \in A_m$  y  $f(n) \neq f(m)$ . Además, para cada  $n \in \omega$  se tiene que  $A_n \cap f[\omega] = \{f(n)\}$ ; y con ello  $f[\omega] \subseteq \omega$  es infinito y casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ . ■

Tomando cualquier familia infinita  $\mathcal{A}$  y aplicando [Lema 1.1.10](#), se obtiene una familia maximal  $\mathcal{B} \supseteq \mathcal{A}$  de tamaño infinito. Por el resultado anterior, tal infinito debe ser más que numerable. Esta consecuencia es tan inmediata como, quizás, poco satisfactoria; pues su naturaleza es «no constructiva». Durante la posterior sección se mostrarán métodos para obtener estos últimos objetos de una manera más explícita.

**Observación 1.1.12.** Existe una familia maximal de tamaño al menos  $\aleph_1$ .

## 1.2. Familias casi ajena de tamaño $\mathfrak{c}$

Al tomar un espacio de Fréchet  $X$  y cualquier subespacio denso  $D \subseteq X$ , para cada  $x \in X \setminus D$  ha de existir una sucesión en  $D$  convergente a  $x$ . Si a  $X$  le adicionamos la condición de ser  $T_1$ , la imagen de tal sucesión es necesariamente un conjunto numerable  $A_x \subseteq D$ , convergente a  $x$  en  $X$  (**revisar PRELIMS**).

**Proposición 1.2.1.** Supóngase que  $X$  es un espacio de Hausdorff, de Fréchet y que  $D \subseteq X$  es denso y numerable. Para cada  $A \subseteq X \setminus D$  existe una familia casi ajena sobre  $D$  biyectable con  $A$ .

**Demuestra.** Con sustento en los comentarios previos, para cada  $x \in A$  fíjese (AC) un conjunto  $A_x \subseteq D$  numerable y convergente a  $x$  en  $X$ . Defínase la colección  $\mathcal{A}_{D,A}$  como  $\{A_x \subseteq D \mid x \in A\} \subseteq [D]^\omega$ .

Sean  $x, y \in A$  con  $x \neq y$ , por ser  $X$  de Hausdorff, hay abiertos ajenos  $U, V$  tales que  $x \in U$  y  $y \in V$ . Seguido de que  $A_x \rightarrow x$  y  $A_y \rightarrow y$ , se tiene  $A_x \subseteq^* U$  y  $A_y \subseteq^* V$ ; consecuentemente  $A_x \cap A_y \subseteq^* U \cap V = \emptyset$ . Lo cual prueba que  $\mathcal{A}_{D,A} \in \text{AD}(D)$  y  $|\mathcal{A}_{D,A}| = |A|$ . ■

**Definición 1.2.2.** Si  $X, D$  y  $A$  son como en la Proposición anterior, a  $\mathcal{A}_{D,A}$  se le denomina **familia de sucesiones en  $D$  convergentes a  $A$  en  $X$** .

Como la recta real  $\mathbb{R}$  es de Hausdorff, de Fréchet (por ser 1 AN) y  $\mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R}$  es un subespacio denso numerable; de lo previamente establecido se obtiene que  $\mathcal{A}_{\mathbb{Q}, \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}}$  es una familia casi ajena sobre  $\mathbb{Q}$  de tamaño  $\mathfrak{c} = |\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}|$ . Conviene destacar que la construcción recién mencionada no depende del AC; pues para cada  $x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ , el conjunto  $A_x$  de la [Proposición 1.2.1](#) se puede construir de manera

explícita. Si  $q : \omega \rightarrow \mathbb{Q}$  es cualquier biyección, basta considerar:

$$A_x = \left\{ q \left( \min \left( q^{-1} \left[ \mathbb{Q} \cap \left( x - \frac{1}{n+1}, x - \frac{1}{n} \right) \right] \right) \mid n \in \omega \setminus \{0\} \right) \right\}.$$

El corazón de la próxima estrategia para la obtención explícita de familias casi ajenas de tamaño el continuo, son los árboles.

Comenzaremos observando que si  $S$  es cualquier rama de un árbol  $(T, \leq)$ , entonces  $S$  es cerrada bajo cotas inferiores. En efecto, sean  $x \in S$  y  $y \leq x$ . Para cada  $s \in S$ , al ser  $S$  cadena, se tiene que  $x \leq s$  o  $s < x$ . En el primer caso,  $y \leq x \leq s$  y  $y$  es comparable con  $s$ . En el segundo  $y, s < x$ ; y como  $(\{y \in T \mid y < x\}, \leq)$  es buen orden,  $y$  y  $s$  son comparables. Por lo tanto,  $S \cup \{y\}$  es una cadena; y seguido de que  $S$  es rama,  $y \in S$ .

**Proposición 1.2.3.** *Sea  $(T, \leq)$  un árbol numerable de altura  $\omega$  y  $\mathcal{A} \subseteq [T]^\omega$  el conjunto de todas las ramas numerables de  $(T, \leq)$ . Entonces  $\mathcal{A} \in \text{AD}(T)$ .*

**Demotación.** Sean  $R, S \in \mathcal{A}$  con  $R \neq S$ , sin pérdida de generalidad, existe  $x_0 \in R \setminus S \neq \emptyset$ . De existir  $y \in R \cap S$  tal que  $y \not< x_0$ , resultaría que  $x_0 \leq y$ , en virtud de que  $x, y \in R$  y  $R$  es rama. Lo anterior y la discusión previa a esta Proposición implican que  $x_0 \in S$ , lo cual es imposible.

Por lo tanto  $R \cap S \subseteq \{y \in T \mid y < z\}$ ; y como  $T$  tiene altura  $\omega$ , el orden de  $x_0$  es un natural; consecuentemente,  $R \cap S$  es finito. ■

Un ejemplo canónico de árbol numerable de altura  $\omega$  es  $2^{<\omega}$  (**véase PRE-LIMS**); considerar la siguiente clase de familias desembocará en resultados sumamente notables (como se puede ver en la [Subsección 4.1.1](#)).

**Proposición 1.2.4.** *Para cada  $f \in 2^\omega$  definase  $A_f := \{f \upharpoonright n \mid n \in \omega\} \subseteq 2^{<\omega}$ ; entonces:*

- i) *Cada  $A_f$  es una rama de  $(2^{<\omega}, \subseteq)$ .*
- ii) *Si  $f \neq g$ , entonces  $A_f \neq A_g$ .*

**Demostración.** (i) Sea  $f \in 2^\omega$ , inmediatamente,  $A_f$  es cadena de  $(2^{<\omega}, \subseteq)$ . Supóngase ahora que  $S \subseteq 2^{<\omega}$  es una rama de  $(2^{<\omega}, \subseteq)$  y que  $A_f \subseteq S$ .

Sean  $g \in S$  y  $n = \text{dom}(g)$ ; puesto que  $S$  es cadena de  $(2^{<\omega}, \subseteq)$  y  $f \in A_f \subseteq S$ , entonces  $f \upharpoonright n \subseteq g$  o  $g \subseteq f \upharpoonright n$ . Cualquiera de los casos anteriores implican que  $f \upharpoonright n = g$ , pues  $\text{dom}(g) = \text{dom}(f \upharpoonright n)$ . Luego,  $g \in A_f$  y entonces  $A_f = S$ .

(ii) Si  $f \neq g$ , entonces existe  $m \in \omega$  tal que  $f(m) \neq g(m)$ . Así, se obtiene que  $f \upharpoonright m + 1 \neq g \upharpoonright m + 1$  y  $f \upharpoonright m + 1 \in R_f \setminus R_g$ , por lo que  $R_f \neq R_g$ . ■

Las proposiciones anteriores permiten definir, de forma explícita y sin recurrir al AC, el siguiente tipo de familias casi ajenas.

**Definición 1.2.5.** Para cada  $X \subseteq 2^\omega$  definase  $\mathcal{A}_X := \{A_f \mid f \in X\}$  como en la Proposición previa.

Esta familia será nombrada la **familia de las ramas de  $X$  en  $2^{<\omega}$** .

En paralelo a lo comentado después de 1.2.2, también se puede concluir vía la construcción recién expuesta, y el Lema 1.1.10, lo siguiente:

**Corolario 1.2.6.** Existe una familia maximal de cardinalidad  $c$ .

En consecuencia, para cualquier cardinal  $\lambda \leq c$  existe una familia casi ajena de cardinalidad  $\lambda$ .

Se concluirá esta sección comentando qué ocurre respecto una interrogante surge naturalmente tras todo lo realizado: Existen familias maximales de cualquier cardinalidad entre  $\aleph_1$  y  $c$ ?

**Definición 1.2.7.** El **cardinal de casi ajenidad**,  $\alpha$ , es el mínimo cardinal infinito  $\kappa$  tal que existe una familia maximal de tamaño  $\kappa$ .

Debido a 1.1.11, se tiene  $\aleph_1 \leq \alpha \leq c$  y claramente bajo CH se debe satisfacer que  $\alpha = c$ ; luego, es consistente con ZFC que  $\alpha = c$ . Comentar que la teoría en relación al cardinal  $\alpha$  es basta y existen resultados de consistencia como el enunciado en seguida:

**Teorema 1.2.8**

Si  $\aleph_1 \leq \kappa \leq \mathfrak{c}$  y  $\kappa$  es cardinal regular, es consistente con ZFC que  $\alpha = \kappa$ .

El Teorema recién enunciado consecuencia de [8, Teo. 5.1, p. 127]; y si bien su demostración escapa a los propósitos del presente texto, sí se expondrán resultados en relación a la igualdad  $\alpha = \mathfrak{c}$  más adelante (véase 1.4.20).

## 1.3. El ideal generado y su comportamiento

**Definición 1.3.1.** Sean  $N$  un conjunto numerable y  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$ .

- i) El **ideal generado por  $\mathcal{A}$**  es el conjunto  $\mathcal{J}_N(\mathcal{A})$ ; definido como la colección  $\{B \subseteq N \mid \exists H \in [\mathcal{A}]^{<\omega} (B \subseteq^* \bigcup H)\}$ .
- ii) La **parte positiva de  $\mathcal{A}$**  es  $\mathcal{J}_N^+(\mathcal{A}) := \mathcal{P}(N) \setminus \mathcal{J}_N(\mathcal{A})$ .

Si  $N = \omega$ , estos conjuntos se denominarán por  $\mathcal{J}(\mathcal{A})$  y  $\mathcal{J}^+(\mathcal{A})$ , respectivamente.

El objeto introducido previamente es de vital importancia para el estudio de la combinatoria de las familias casi ajenas. Como se había advertido anteriormente; con el propósito de no perder generalidad en los resultados expuestos durante esta sección, es necesario notar lo siguiente:

**Proposición 1.3.2.** Sean  $N, M$  conjuntos numerables y  $h : N \rightarrow M$  biyectiva.

Si  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$ , entonces  $\Phi_h(\mathcal{J}_N(\mathcal{A})) = \mathcal{J}_M(\Phi_h(\mathcal{A}))$ .

**Demarcación.** Como  $h$  es biyección,  $\Phi_h^{-1} = \Phi_{h^{-1}}$ . Por lo cual, basta probar la contención directa de la igualdad.

Sea  $Y \in \mathcal{J}_N(\mathcal{A})$ , entonces existe  $H \subseteq \mathcal{A}$  finito tal que  $Y \setminus \bigcup H$  es finito. Como  $h$  es biyectiva,  $h[Y \setminus \bigcup H] = h[Y] \setminus h[\bigcup H] = h[Y] \setminus \bigcup \Phi_h(H)$  es finito. Además, de 1.1.6,  $\Phi_h(H) \subseteq \Phi_h(\mathcal{A})$  es finito. Por ello,  $h[Y] \in \mathcal{J}_M(\Phi_h(\mathcal{A}))$ . ■

Resulta sencillo constatar que el objeto definido en 1.3.1 es; como su nombre indica, un ideal (no necesariamente propio) sobre  $\mathcal{P}(\omega)$ . Además, se destaca lo siguiente:

**Observación 1.3.3.** *Sea  $\mathcal{A}$  cualquier familia casi ajena.*

- i) *Cualquier subconjunto finito de  $\omega$ , así como cualquier elemento de  $\mathcal{A}$ , es elemento de  $\mathcal{I}(\mathcal{A})$ . Por lo que  $\emptyset \subsetneq [\omega]^{<\omega} \cup \mathcal{A} \subseteq \mathcal{I}(\mathcal{A})$ .*
- ii) *Si  $\mathcal{B} \in \text{AD}(\omega)$  y  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{B}$ , entonces  $\mathcal{I}(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{I}(\mathcal{B})$ .*

Obsérvese adempás que si  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$  es finita; en virtud del Lema 1.1.8 se tendrá que  $\omega \in \mathcal{I}(\mathcal{A})$ , pues  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{A}$  es finito y  $\omega \subseteq^* \bigcup \mathcal{A}$ . El recíproco de esto también es cierto.

**Proposición 1.3.4.** *Sea  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$  cualquiera. Si  $\omega \in \mathcal{I}(\mathcal{A})$ , entonces  $\mathcal{A}$  es maximal y finita.*

**Demostración.** Supóngase que  $\omega \in \mathcal{I}(\mathcal{A})$ , entonces existe  $H \subseteq \mathcal{A}$  finito con  $\omega \subseteq^* \bigcup H \subseteq \bigcup \mathcal{A}$ . Por 1.1.9, basta ver que  $\mathcal{A}$  es finita.

Supóngase que existe  $B \in \mathcal{A} \setminus H$ . Así,  $B$  casi ajeno con cada elemento de  $H \subseteq \mathcal{A}$ , luego,  $B \cap \bigcup H = \bigcup \{B \cap h \mid h \in H\}$  es finito. De lo anterior,  $B = B \cap \omega \subseteq^* B \cap \bigcup H$  es finito, lo cual es imposible. Por lo tanto,  $\mathcal{A} \subseteq H$  y  $\mathcal{A}$  es finita. ■

**Corolario 1.3.5.** *Sean  $N$  un conjunto numerable y  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$ . Las siguientes condiciones son equivalentes:*

- i) *El ideal  $\mathcal{I}_N(\mathcal{A})$  no es propio, es decir,  $N \in \mathcal{I}_N(\mathcal{A})$ .*
- ii)  *$\mathcal{A}$  es finita y maximal en  $N$ .*

Con relativa frecuencia aparecerán familias que, pese a no ser maximales, satisfacen la condición (ii) de lo subsecuente; esta puede ser tomada como un debilitamiento a la condición de maximalidad.

**Definición 1.3.6.** Sean  $N$  un conjunto numerable y  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$ .

- i) Para cada  $X \in [N]^\omega$ , la **traza de  $\mathcal{A}$  en  $X$**  es la colección  $\mathcal{A} \upharpoonright X$ , definida como el conjunto  $\{A \cap X \in [X]^\omega \mid A \in \mathcal{A}\}$ .
- ii)  $\mathcal{A}$  es **maximal en alguna parte** si y sólo si existe  $X \in \mathcal{I}_N^+(\mathcal{A})$  tal que la familia  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  es maximal en  $X$ .
- iii)  $\mathcal{A}$  es **maximal en ninguna parte** si no es maximal en alguna parte.

Si  $X \in [N]^\omega$ , entonces  $\mathcal{A} \upharpoonright X \in \text{AD}(X)$ . Más aún, si  $\mathcal{A}$  es maximal, para cada  $B \subseteq X$  infinito existe  $A \in \mathcal{A}$  tal que  $A \cap B = (A \cap X) \cap (B \cap X)$  es infinito, mostrando la maximalidad de  $\mathcal{A} \upharpoonright X$ . Así que, efectivamente, la definición anterior es un debilitamiento de la condición de maximalidad.

Sin causa de asombro, los conceptos recién establecidos son respetados por las biyecciones  $\Phi_h$ .

**Proposición 1.3.7.** Sean  $N, M$  conjuntos numerables,  $h : N \rightarrow M$  biyección y  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$ .

- i) Para cada  $X \in [N]^\omega$  se cumple  $\Phi_h(\mathcal{A}) \upharpoonright h[X] = \Phi_h(\mathcal{A} \upharpoonright X)$ .
- ii)  $\mathcal{A}$  es maximal en alguna parte si y sólo si  $\Phi_h(\mathcal{A})$  también lo es.

**Demuestra**ción. (i) Como  $h$  biyección, de la definición de  $\Phi_h(\mathcal{A})$  se obtiene:

$$\begin{aligned} \Phi_h(\mathcal{A}) \upharpoonright h[X] &= \{B \cap h[X] \in [h[X]]^\omega \mid B \in \Phi_h(\mathcal{A})\} \\ &= \{h[A] \cap h[X] \in [h[X]]^\omega \mid A \in \mathcal{A}\} \\ &= \{h[A \cap X] \mid A \cap X \in [X]^\omega \wedge A \in \mathcal{A}\} \\ &= \Phi_h(\mathcal{A} \upharpoonright X). \end{aligned}$$

(ii) Como  $\Phi_h^{-1} = \Phi_{h^{-1}}$ , basta probar la suficiencia. Supóngase que  $\mathcal{A}$  es maximal en alguna parte, entonces existe  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  tal que  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  es maximal en  $X$ .

Dada la igualdad de 1.3.2,  $h[X] \in \mathcal{J}^+(\Phi_h(\mathcal{A}))$ ; además, la función de restricción  $g := h \upharpoonright X : X \rightarrow h[X]$  es biyección y utilizando el inciso anterior se tiene que  $\Phi_h(\mathcal{A}) \upharpoonright h[X] = \Phi_h(\mathcal{A} \upharpoonright X) = \Phi_g(\mathcal{A} \upharpoonright X)$ . Por el último inciso de 1.1.6,  $\Phi_h(\mathcal{A}) \upharpoonright h[X]$  es maximal en  $h[X]$ .  $\blacksquare$

Las siguientes propiedades son esperables, pero no por ello menos útiles. Es importante no desdeñar sus pruebas, pues en ellas, hay un par de sutilezas que deben ser atendidas.

**Proposición 1.3.8.** *Sean  $\mathcal{A}, \mathcal{B} \in \text{AD}(\omega)$  y  $X, Y \in [\omega]^\omega$  arbitrarios.*

- i) *Si  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{B}$ , entonces  $\mathcal{A} \upharpoonright X \subseteq \mathcal{B} \upharpoonright X$ .*
- ii) *Se da la igualdad  $(\mathcal{A} \upharpoonright Y) \upharpoonright X = \mathcal{A} \upharpoonright (Y \cap X)$ .*
- iii) *Si  $X \subseteq Y$ , entonces  $\mathcal{J}_X(\mathcal{A} \upharpoonright X) \subseteq \mathcal{J}_Y(\mathcal{A} \upharpoonright Y)$ .*

**Demostración.** El punto (i) es claro.

(ii) Si  $(A \cap Y) \cap X \in (\mathcal{A} \upharpoonright Y) \upharpoonright X$ , entonces  $A \cap Y \in \mathcal{A} \upharpoonright Y$  y  $(A \cap Y) \cap X = A \cap (Y \cap X)$  es infinito; luego,  $A \in \mathcal{A}$  y  $(A \cap Y) \cap X \in \mathcal{A} \upharpoonright (Y \cap X)$ . Recíprocamente, si  $A \cap (Y \cap X) \in \mathcal{A} \upharpoonright (Y \cap X)$ , entonces  $A \in \mathcal{A}$  y  $A \cap (Y \cap X) = (A \cap Y) \cap X$  es infinito. Además,  $A \cap (Y \cap X) \subseteq A \cap Y$ , entonces  $A \cap Y$  es infinito, por lo que  $A \cap Y \in \mathcal{A} \upharpoonright Y$  y así  $A \cap (Y \cap X) = (A \cap Y) \cap X \in (\mathcal{A} \upharpoonright Y) \upharpoonright X$ .

(iii) Supóngase que  $X \subseteq Y$  y sea  $B \in \mathcal{J}_X(\mathcal{A} \upharpoonright X)$ . Entonces  $B \subseteq X \subseteq Y$  y existe  $H \subseteq \mathcal{A} \upharpoonright X$  finito tal que  $B \subseteq^* \bigcup H$ . Cada elemento  $A \cap X \in H$  es infinito y está contenido en  $A \cap Y$ , luego  $J := \{A \cap Y \mid A \cap X \in H\} \subseteq \mathcal{A} \upharpoonright Y$  es finito y  $B \subseteq^* \bigcup J$  y por lo tanto  $B \in \mathcal{J}_Y(\mathcal{A} \upharpoonright Y)$ .  $\blacksquare$

Si bien se demostró, tras la Definición 1.3.6, que la maximalidad de una familia implica la de cada una de sus trazas. La próxima observación muestra que la maximalidad de aquellas trazas tomadas sobre elementos del ideal generado no constituye una condición suficiente para concluir la maximalidad de la familia dada.

**Proposición 1.3.9.** Sean  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$  y  $X \in [\omega]^\omega$ . Entonces  $X \in \mathcal{I}(\mathcal{A})$  si y sólo si la familia  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  es finita y maximal en  $X$ .

**Demuestra.** Por el Corolario 1.3.5, basta mostrar que  $X \in \mathcal{I}(\mathcal{A})$  si y sólo si  $X \in \mathcal{I}_X(\mathcal{A} \upharpoonright X)$ . Dado lo demostrado en 1.3.8, la necesidad de tal equivalencia es inmediata. Ahora, si  $X \in \mathcal{I}(\mathcal{A})$ , entonces  $X \subseteq^* \bigcup H$  para cierto  $H \in [\mathcal{A}^{<\omega}]$ . Luego  $X \subseteq^* X \cap \bigcup H$  y la finitud de  $H$  implica que:

$$\begin{aligned} X &\subseteq^* \{A \cap X \in [X]^{<\omega} \mid A \in H\} \cup \{A \cap X \in [X]^\omega \mid A \in H\} \\ &=^* \{A \cap X \in [X]^\omega \mid A \in H\}, \end{aligned}$$

probando que  $X \in \mathcal{I}_X(\mathcal{A} \upharpoonright X)$ . ■

Como la familia vacía no es maximal, la Proposición anterior deja como reflexión que los únicos conjuntos que podrían ser testigos de que  $\mathcal{A}$  no es maximal, son aquellos que pertenecen a la parte positiva de  $\mathcal{A}$ .

**Corolario 1.3.10.** Si  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$ ,  $\{X \in [\omega]^\omega \mid \mathcal{A} \upharpoonright X = \emptyset\} \subseteq \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ .

Si  $X \in [\omega]^\omega$  y  $\mathcal{A}$  es maximal, entonces  $X$  debe tener intersección infinita con algún elemento de  $\mathcal{A}$ ; los conjuntos en  $\mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  tienen un comportamiento más fuerte, cada uno de ellos tiene intersección infinita con una infinidad de elementos de  $\mathcal{A}$ .

**Corolario 1.3.11.** Sea  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$ . Entonces  $\mathcal{A}$  es maximal si y sólo si para cada  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  la familia  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  es infinita.

**Demuestra.** Supóngase que  $\mathcal{A}$  es maximal y sea  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ . Por la maximalidad de  $\mathcal{A}$ , se sigue de lo comentado tras la Definición 1.3.6 que  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  es maximal en  $X$ . Por lo que, acorde a 1.3.9,  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  debe ser infinita.

Recíprocamente, si  $\mathcal{A}$  no es maximal, existe  $B \in [\omega]^\omega$  casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ . Así,  $\mathcal{A} \upharpoonright B = \emptyset$  y se sigue de 1.3.10, que  $B \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ . ■

Como ninguna familia maximal es numerable, del Corolario anterior se desprende la siguiente condensación de todo lo comentado y demostrado tras 1.3.6.

**Corolario 1.3.12.** Sean  $N$  un conjunto numerable y  $\mathcal{A} \in \text{AD}(N)$ . Entonces  $\{X \in [N]^\omega \mid \mathcal{A} \upharpoonright X \in \text{MAD}(X) \wedge \omega \leq |\mathcal{A} \upharpoonright X|\} \subseteq \mathcal{I}_N^+(\mathcal{A})$ . La contención recíproca ocurre si y sólo si  $\mathcal{A}$  es maximal, y en tal caso:

$$\{X \in [N]^\omega \mid \omega < |\mathcal{A} \upharpoonright X|\} = \mathcal{I}_N^+(\mathcal{A}).$$

## 1.4. Resultados en combinatoria infinita

### 1.4.1. Teorema de Simon

Se abordará en lo subsecuente un análisis simple sobre la combinatoria de las familias casi ajena. Los próximos lemas configuran la antesala para enunciar el primer resultado importante de la sección, el Teorema de Simon (1.4.3).

**Lema 1.4.1.** Sea  $(X_n)_{n \in \omega} \subseteq [\omega]^\omega$  una sucesión  $\subseteq$ -decreciente. Entonces existe  $Y \in [X_0]^\omega$  tal que para cada  $k \in \omega$ , ocurre  $Y \subseteq^* X_k$ .

**Demostración.** Considérese la función  $f : \omega \rightarrow X_0$ , dada recursivamente por  $f(n) = \min(X_n \setminus f[n])$ . Nótese que  $f$  es inyectiva, si  $m < n$  entonces  $f(n) \notin f[n]$  y particularmente  $f(n) \neq f(m)$ . En consecuencia,  $Y := f[\omega] \in [X_0]^\omega$ .

Si  $k \in \omega$ , cada  $x = f(n) \in Y \setminus X_k$  debe satisfacer que  $n < k$ , dada la hipótesis sobre  $(X_n)_{n \in \omega}$ . Esto prueba que  $Y \setminus X_k \subseteq f[k] =^* \emptyset$ ; es decir,  $Y \subseteq^* X_k$ . ■

El siguiente resultado constata que la parte positiva de una familia es grande, en el sentido de que esta contiene la suficiente cantidad de elementos como para acotar inferiormente a cualquier  $\subseteq$ -cadena numerable contenida en ella.

**Lema 1.4.2** (Dokálková). Sean  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$  y  $(X_n)_{n \in \omega} \subseteq \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  una sucesión  $\subseteq$ -decreciente. Existe  $Y \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  tal que si  $n \in \omega$ , entonces  $Y \subseteq^* X_n$ .

**Democión.** Por el Corolario 1.3.12, si  $n \in \omega$ ,  $H_n := \{A \in \mathcal{A} \mid A \cap X_n \neq^* \emptyset\}$  debe ser infinito. Para cada  $n \in \omega$  fijese (AC) una función  $f_n : \mathcal{P}(H_n) \setminus \{\emptyset\} \rightarrow H_n$  de elección; y defínase recursivamente  $B : \omega \rightarrow \mathcal{A}$  como  $B(n) = f(H_n \setminus B[n])$ .

Así,  $(\bigcup \{B(m) \mid m \geq n\} \cap X_n)_{n \in \omega}$  satisface las hipótesis del Lema previo. Efectivamente; si  $n \in \omega$ , entonces  $B(n) \in H_n$  y  $\bigcup \{B(m) \mid m \geq n\} \cap X_n \supseteq B(n) \cap X_n$  es infinito. Esta sucesión es  $\subseteq$ -decreciente, debido a que  $(X_n)_n \in \omega$  también lo es. Por lo tanto, existe  $Y \in [\omega]^\omega$  de manera que para cada  $k \in \omega$ :

$$Y \subseteq^* \bigcup \{B(m) \mid m \leq k\} \cap X_n \subseteq B(k) \cap X_k \subseteq X_k.$$

Y, al ser  $Y$  infinito, se tiene que  $Y \cap B(k) \supseteq X \cap (B(k) \cap X_k)$  es infinito. Por lo tanto  $\mathcal{A} \upharpoonright Y$  es infinita; siguiéndose del Corolario 1.3.12 que  $Y \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ . ■

El siguiente resultado fue demostrado en 1980 por Petr Simon [13, p. 751] y como se verá más adelante (Corolario 3.2.4), juega un papel fundamental en el estudio de la propiedad topológica de Fréchet.

#### Teorema 1.4.3 (Simon)

Para toda familia maximal e infinita  $\mathcal{A}$  existe  $Y \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  tal que  $\mathcal{A} \upharpoonright Y$  es unión ajena de dos familias maximales en ninguna parte.

**Democión.** Procédase por contradicción suponiendo que  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$  es una familia infinita tal que si  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ ,  $\mathcal{A} \upharpoonright X = \mathcal{B} \cup \mathcal{C}$  y  $\mathcal{B} \cap \mathcal{C} = \emptyset$ , entonces alguna de las familias  $\mathcal{B}, \mathcal{C} \in \text{AD}(X)$  es maximal en alguna parte.

Como  $\omega < |\mathcal{A}| \leq |2^\omega|$ , existe  $F \subseteq 2^\omega$  infinito y tal que  $\mathcal{A} = \{A_f \mid f \in F\}$ ; donde  $f \neq g$  implica  $A_f \neq A_g$ . Para cada  $(n, k) \in \omega \times 2$  defínase:

$$\mathcal{A}(n, k) = \{A_f \in \mathcal{A} \mid f(n) = k\}.$$

Nótese que para cualesquiera  $m \in \omega$  y  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  ocurren simultáneamente  $\mathcal{A} \upharpoonright X = \mathcal{A}(m, 0) \upharpoonright X \cup \mathcal{A}(m, 1) \upharpoonright X$  y  $\mathcal{A}(m, 0) \upharpoonright X \cap \mathcal{A}(m, 1) \upharpoonright X = \emptyset$ . Se sigue de la hipótesis la existencia (AC) de una función  $k : \omega \times \mathcal{I}^+(\mathcal{A}) \rightarrow 2$  tal que si  $(m, X) \in \text{dom}(k)$ , entonces  $\mathcal{A}(m, k(m, X)) \upharpoonright X$  es maximal en alguna parte. Así mismo, existe una función  $j : \omega \times \mathcal{I}^+(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{I}_X^+(\mathcal{A}(m, k(m, X)) \upharpoonright X)$  de manera que para cada  $(m, X) \in \text{dom}(j)$ :

$$(\mathcal{A}(m, k(m, X)) \upharpoonright X) \upharpoonright j(m, X) = \mathcal{A}(m, k(m, X)) \upharpoonright j(m, X) \in \text{MAD}(j(m, X)).$$

Defínase recursivamente la sucesión  $(X_n)_{n \in \omega}$  como  $X_0 = \omega$ ; y para cada  $n \in \omega$ ,  $X_{n+1} = j(n, X_n)$ . Si  $n \in \omega$ , se da  $X_{n+1} \in \mathcal{J}_{X_n}^+(\mathcal{A}(n, k(n, X_n)) \upharpoonright X_n) \subseteq \mathcal{J}^+(\mathcal{A})$  (véase 1.3.8); y además, por la definición de  $j$ :

$$\mathcal{A}(n, k(n, X_n)) \upharpoonright X_{n+1} \in \text{MAD}(X_{n+1});$$

a consecuencia del ello  $X_{n+1} \subseteq X_n$ . Aplicando el Lema de Dokálková, se obtiene un conjunto  $Y \in \mathcal{J}^+(\mathcal{A})$  casi contenido en cada  $X_n$ .

Por 1.3.12,  $\mathcal{A} \upharpoonright Y$  es infinita; y por ello, existen  $g \in F$  y  $m \in \omega$  tales que  $g(m) \neq k(m, X_m)$  y  $A_g \cap Y$  es infinito. Puesto que  $Y \setminus X_{m+1} =^* \emptyset$ , es necesario que  $A_g \cap X_{m+1} \subseteq X_{m+1}$  sea infinito y como  $\mathcal{A}(m, k(m, X_m)) \upharpoonright X_{m+1} \in \text{MAD}(X_{m+1})$ , existe  $A_f \in \mathcal{A}(m, k(m, X_m))$  tal que  $(A_g \cap X_{m+1}) \cap (A_f \cap X_{m+1}) =^* \emptyset$ . Pero, a razón de que  $f(m) = k(m, X_m) \neq g(m)$ , se tiene que  $f \neq g$  y  $A_f \cap A_g =^* \emptyset$ , lo cual es un absurdo a lo previamente establecido. ■

La familia  $\mathcal{A} \upharpoonright Y$  provista por el Teorema de Simon es maximal e infinita necesariamente. Así que, tomando en cualquier  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$  infinita se tiene:

**Corolario 1.4.4.** *Existe una familia maximal infinita que es unión ajena de dos familias maximales en ninguna parte.*

#### 1.4.2. Grietas y familias de Luzin

La teoría de grietas («gaps», en inglés) es extensa, y su estudio se remonta a los trabajos de Felix Hausdorff. En lo que sigue nos restringiremos a analizar grietas en  $\omega$ . No obstante, a partir de la Proposición 1.1.6 es inmediato comprobar que la definición que presentamos a continuación se extiende sin dificultad a grietas sobre cualquier conjunto numerable  $N$ .

**Definición 1.4.5.** Una **grieta** es un par ordenado  $(\mathcal{A}, \mathcal{B}) \in \text{AD}(\omega) \times \text{AD}(\omega)$  tal que  $\mathcal{A} \cup \mathcal{B} \in \text{AD}(\omega)$ .

- i) Se suele decir que  $\mathcal{A} \cup \mathcal{B}$  **contiene a**  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ .

- ii) Un subconjunto  $D \subseteq \omega$  es **separador** de  $\mathcal{A}$  y  $\mathcal{B}$  si y sólo si para cualesquiera  $A \in \mathcal{A}$  y  $B \in \mathcal{B}$  se tiene que  $A \subseteq^* D$  y  $B \cap D =^* \emptyset$ .
- iii)  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$  está **separada** cuando existe un separador de  $\mathcal{A}$  y  $\mathcal{B}$ .

En términos de la definición anterior, es inmediato que si  $(\mathcal{A}', \mathcal{B}')$  es una grieta separada,  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{A}'$  y  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{B}'$ , entonces la grieta  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$  está separada. Además, cuando  $D$  es separador de  $\mathcal{A}$  y  $\mathcal{B}$ , el conjunto  $\omega \setminus D$  es separador de  $\mathcal{B}$  y  $\mathcal{A}$ ; por ello,  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$  está separada si y sólo si  $(\mathcal{B}, \mathcal{A})$  está separada. Obsérvese además que seguido del [Corolario 1.3.10](#):

**Proposición 1.4.6.** Para toda grieta  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ ,  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{I}^+(\mathcal{B})$  y  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ .

Al considerar una familia casi ajena, surgen preguntas en relación al comportamiento de las grietas contenidas en ella; en tal aspecto se mueve la siguiente definición.

**Definición 1.4.7.** Una familia  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$  se dice:

- i) **Separable** (o **normal**) cuando todas las grietas  $(\mathcal{B}, \mathcal{C}) \in \mathcal{P}(\mathcal{A})^2$  están separadas.
- ii) **Parcialmente separable** cuando para toda grieta  $(\mathcal{B}, \mathcal{C}) \in ([\mathcal{A}]^{\omega_1})^2$  existen  $\mathcal{B}' \subseteq \mathcal{B}$  y  $\mathcal{C}' \subseteq \mathcal{C}$  tales que  $(\mathcal{B}', \mathcal{C}')$  está separada.
- iii) **Inseparable** cuando ninguna grieta  $(\mathcal{B}, \mathcal{C}) \in ([\mathcal{A}]^{\omega_1})^2$  está separada.

Se obtiene el siguiente comportamiento; la demostración del mismo puede ser realizada con lo desarrollado hasta el momento, sin embargo, dejaremos este resultado como una consecuencia del estudio de los  $\Psi$ -espacios (véase [4.1.5](#))

**Ejemplo 1.4.8.** Sea  $\mathcal{C} \in \text{AD}(\omega)$ . Si  $|\mathcal{C}| \leq \omega$ , entonces  $\mathcal{C}$  es separable. Y, si  $\mathcal{C}$  más que numerable y separable, entonces  $\omega < |\mathcal{C}| < \mathfrak{c}$  y  $\mathcal{C} \notin \text{MAD}(\omega)$ .

Obsérvese ahora que si  $(\mathcal{B}, \mathcal{C})$  es una grieta y  $\bigcup \mathcal{B} \cap \bigcup \mathcal{C}$  es finito, entonces el conjunto  $\bigcup \mathcal{B} \subseteq \omega$  es separador de  $\mathcal{B}$  y  $\mathcal{C}$ . Se puede caracterizar la inseparabilidad de una familia mediante lo siguiente:

**Lema 1.4.9.** *Sea  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$ , entonces  $\mathcal{A}$  es inseparable si y sólo si para cualesquiera  $\mathcal{B}, \mathcal{C} \in [\mathcal{A}]^{\omega_1}$  ajenos,  $\bigcup \mathcal{B} \cap \bigcup \mathcal{C}$  es infinito.*

**Demostración.** Por la discusión previa, basta sólo probar la necesidad.

Por contrapuesta, supóngase que  $\mathcal{B}, \mathcal{C} \in [\mathcal{A}]^{\omega_1}$  son tales que existe  $D \subseteq \omega$ , separador de  $\mathcal{B}$  y  $\mathcal{C}$ . Entonces las asignaciones  $\mathcal{B} \rightarrow \omega$  y  $\mathcal{C} \rightarrow \omega$ ; dadas por  $b \mapsto \max(b \setminus D) + 1$  y  $c \mapsto \max(c \cap D) + 1$  están bien definidas. Pero en vista de que  $|\mathcal{B}| = |\mathcal{C}| = \omega_1$ , estas no pueden ser inyectivas, y existen  $m, n \in \omega$  de modo que  $\mathcal{B}' := \{b \in \mathcal{B} \mid b \setminus D \subseteq m\}$  y  $\mathcal{C}' := \{c \in \mathcal{C} \mid c \cap D \subseteq n\}$  tienen tamaño  $\omega_1$ .

Además  $\bigcup \mathcal{B}' \setminus D \subseteq m =^* \emptyset$  y  $\bigcup \mathcal{C}' \cap D \subseteq n =^* \emptyset$ , por lo que  $\bigcup \mathcal{B} \subseteq^* D$ ,  $\bigcup \mathcal{C} \subseteq^* \omega \setminus D$ , y así,  $\bigcup \mathcal{B}' \cap \bigcup \mathcal{C}' \subseteq^* D \cap (\omega \setminus D) = \emptyset$ . ■

En la década de 1910, el analista Nikolai Luzin introdujo ciertos subconjuntos especiales de  $\mathbb{R}$ , mismos que hoy llevan su nombre. Y pese a que el estudio de aquellos objetos es relativo a la teoría descriptiva de conjuntos, las analogías entre sus propiedades y las de las familias que a continuación presentamos, son suficiente razón como para que estas lleven el sufijo «de Luzin».

**Definición 1.4.10.** *Una familia  $\mathcal{A}$  es **de Luzin** cuando existen  $X \in [\omega_1]^{\omega_1}$  y una enumeración  $\mathcal{A} = \{A_\alpha \mid \alpha \in X\}$  tales que para todo  $(\alpha, n) \in \omega_1 \times \omega$ , el conjunto  $\{\beta < \alpha \mid A_\alpha \cap A_\beta \subseteq n\}$  es finito.*

Una de las ideas centrales detrás de que  $\mathcal{A} = \{A_\alpha \mid \alpha \in \omega_1\}$  sea de Luzin es que; fijando  $\alpha \in \omega_1$ , para cada  $D \subseteq \alpha$  infinito,  $A_\alpha \cap \bigcup \{A_\beta \mid \beta \in D\}$  es infinito. Esto se debe a que si  $n \in \omega$ , entonces  $D \setminus \{\beta < \alpha \mid A_\alpha \cap A_\beta \subseteq n\}$  es infinito, particularmente no vacío. Como consecuencia:

**Proposición 1.4.11.** *Cualquier familia Luzin es inseparable.*

**Democión.** Sean  $\mathcal{A} = \{A_\alpha \mid \alpha \in \omega_1\}$  una familia de Luzin y supóngase que  $\mathcal{B} = \{A_\alpha \mid \alpha \in B\}$ ,  $\mathcal{C} = \{A_\alpha \mid \alpha \in C\} \subseteq \mathcal{A}$  son no numerables y ajenos. Como  $C$  es infinito, existe  $\alpha \in \omega_1$  de manera que  $C \cap \alpha$  es infinito. Nótese que  $B$  es cofinal en  $\omega_1$ , por ser  $\omega_1$  regular; así que sin pérdida de generalidad, supóngase  $\alpha \in B$ .

Dados los comentarios previos a esta demostración,  $A_\alpha \cap \bigcup \{A_\beta \mid \beta \in C \cap \alpha\}$  es infinito, demostrando que  $\bigcup \mathcal{B} \cap \bigcup \mathcal{C}$  es infinito, y se sigue del Lema 1.4.9, que  $\mathcal{A}$  es inseparable. ■

La existencia de familias de Luzin no es tan inicitada, resulta que cualquier familia infinita trae consigo una extensión que es de Luzin.

**Proposición 1.4.12.** *Toda familia casi ajena numerable se extiende a una familia de Luzin. Particularmente, existe una familia de Luzin.*

**Democión.** Sea  $\mathcal{B} = \{A_n \mid n \in \omega\} \in \text{AD}(\omega)$  numerable y nótese que para cualesquiera  $m, n \in \omega$ , el conjunto  $\{k < m \mid A_m \cap A_k \subseteq n\}$  es finito.

Por recursión sobre  $\omega_1 \setminus \omega$ , sea  $\gamma \in \omega_1 \setminus \omega$  y supóngase  $\{A_\alpha \mid \alpha \in \gamma\}$  es una familia tal que, si  $\alpha < \gamma$  y  $n \in \omega$ , el conjunto  $\{\beta < \alpha \mid A_\alpha \cap A_\beta \subseteq n\}$  es finito.

Como  $\gamma \in \omega \setminus \omega_1$ ,  $\gamma$  es numerable y se puede enumerar  $\{A_\alpha \mid \alpha \in \gamma\}$  como  $\{B_n \mid n \in \omega\}$ . Por ser tal, una familia casi ajena, cada conjunto  $C_n := B_n \setminus \bigcup \{B_j \mid j < n\}$  es infinito (corrobórese ésto en la demostración de 1.1.11). Para cada  $n \in \omega$  fíjese  $a_n \in [C_n]^n$  y defínase:

$$A_\gamma := \bigcup \{a_m \mid m \in \omega\}$$

Nótese que si  $n \neq m$ , entonces  $a_n \cap a_m = \emptyset$ . De este modo, si  $n \in \omega$  es cualquiera, resulta que  $A_\gamma \cap B_n = a_n \cap B_n = a_n$  es finito. Más aún, como  $a_n$  tiene exactamente  $n$  elementos,  $n \leq \max(A_n)$ ; y consecuentemente, si  $m \in \omega$  y  $A_\gamma \cap B_n \subseteq m$ , entonces  $n \leq m$ .

Lo anterior prueba, no sólo que  $\{A_\alpha \mid \alpha \leq \gamma\}$  es familia casi ajena, sino que para cualesquiera  $\alpha \leq \gamma$  y  $n \in \omega$ , el conjunto  $\{\beta < \alpha \mid A_\alpha \cap A_\beta \subseteq n\}$  es finito. Lo cual finaliza la construcción por recursión de los conjuntos  $A_\alpha$  (con  $\omega \leq \alpha < \omega_1$ ); es claro que para  $\mathcal{A} := \{A_\alpha \mid \alpha \in \omega_1\}$  es una familia Luzin que extiende a  $\mathcal{B}$ . ■

Los siguientes objetos son una suerte de modificación a la Definición 1.4.10; mientras que las familias de Luzin son «unidimensionales», en el sentido de que están indexadas por  $\omega_1$ ; las grietas de Luzin son « $n$ -dimensionales»:

**Definición 1.4.13.** Sea  $n \in \omega \setminus 2$ . Una  **$n$ -grieta de Luzin** es una sucesión finita  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I} \subseteq \text{AD}(\omega)$  cuya unión es una familia casi ajena; y, tales que existen  $X \in [\omega_1]^{\omega_1}$  y  $m \in \omega$ , de modo que cada  $\mathcal{A}_i$  se puede enumerar como  $\{A_\alpha^i \mid \alpha \in X\}$  de manera que:

- i) Para cualesquiera  $i, j \in n$  distintos y  $\alpha \in X$ , se da  $A_\alpha^i \cap A_\alpha^j \subseteq m$ .
- ii) Si  $\alpha, \beta \in X$  y  $\alpha \neq \beta$ , entonces  $\bigcup \{A_\alpha^i \cap A_\beta^j \mid i, j \in n \wedge i \neq j\} \not\subseteq m$ .

A los conjuntos  $X$  y  $m$  se les llama testigos de que  $(\mathcal{A}_i \mid i \in I)$  es  $n$ -grieta de Luzin. Una 2-grieta de Luzin se denomina simplemente **grieta de Luzin**.

Las  $n$ -grietas de Luzin poseen un comportamiento en común a las familias Luzin, el comentado posteriormente a la Definición 1.4.10. Este comportamiento similar es la razón de que, según la literatura que se consulte, a veces se confunden los términos «familia de Luzin» y «grieta de Luzin».

**Lema 1.4.14.** Sea  $(\mathcal{A}_i \mid i \in I)$  una  $n$ -grieta de Luzin con testigos  $X$  y  $m$ . Para cada  $Y \subseteq X$  no numerable, existe  $Y' \subseteq Y$  no numerable tal que para cualesquiera  $\alpha, \beta \in Y'$  distintos,  $\bigcup \{A_\alpha^i \cap A_\beta^j \mid i, j \in n \wedge i \neq j\}$  es infinito.

**Demuestra.** Sea  $k \in \omega \setminus m$ . Para cada  $i \in n$  sea  $f_i : Y \rightarrow \omega$  dada por  $f_i(\alpha) = A_\alpha^i \cap k$ . Para cada  $S \in [X]^{>\omega}$  y  $g : Z \rightarrow \omega$ ,  $g$  no es inyectiva; fíjese entonces (AC) un conjunto  $S(g) \subseteq S$  no numerable para el cual  $g \upharpoonright A_g$  es constante. Defínase la sucesión finita  $(Y_i)_{i \in n}$  de manera recursiva como  $Y_0 := Y$ ; y, para cada  $j \in n$ ,  $Y_{j+1} := S(f \upharpoonright Y_j) \subseteq Y_j$ .

Entonces el conjunto  $Y' := \bigcap \{Y_i \mid i \in n\} = Y_{\cup n}$  es un subconjunto no numerable de  $Y$  tal que para cada  $i \in n$ ,  $f_i$  es constante en  $Y'$ . Sean  $\alpha, \beta \in Y'$  distintos, como  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$  es  $n$ -grieta de Luzin, existen  $i, j \in n$  diferentes de manera que  $A_\alpha^i \cap A_\beta^j \not\subseteq m$ . Como  $f_i$  es constante en  $Y'$ , entonces  $A_\alpha^i \cap k = A_\beta^i \cap k$ .

Como además  $A_\beta^i \cap A_\beta^j \subseteq m \subseteq k$ , resulta necesario que  $A_\alpha^i \cap A_\beta^j \not\subseteq k$ . Así, en virtud de la arbitrariedad del natural  $k$ , se concluye que el siguiente conjunto debe ser infinito:  $\bigcup \{A_\alpha^i \cap A_\beta^j \mid i, j \in n \wedge i \neq j\}$ . ■

A razón de la proposición anterior se desprende que; así como ninguna familia parcialmente separable puede ser de Luzin, resulta que:

**Corolario 1.4.15.** *Si una familia casi ajena es parcialmente separable, no puede contener ninguna  $n$ -grieta de Luzin.*

**Demuestra&on.** Sea  $(\mathcal{A}_i \mid i \in I)$  una  $n$ -grieta de Luzin con testigos  $X$  y  $m$ . Si  $\mathcal{A} \supseteq \bigcup \{\mathcal{A}_i \mid i \in n\}$ , entonces dado el Lema previo a esta demostración, para cualesquiera  $i, j \in n$  distintos, existen  $\alpha, \beta \in X$  diferentes de modo que el conjunto  $\bigcup \{A_\alpha^i \cap A_\beta^j \mid i, j \in n \wedge i \neq j\}$  es infinito. Es decir,  $\bigcup \mathcal{A}_i \cap \bigcup \mathcal{A}_j$  es infinito, siguiéndose la conclusión automáticamente de 1.4.9. ■

La siguiente Proposición deja en claro la labor de «debilitamiento» que cumplen las  $n$ -grietas de Luzin respecto a las familias de Luzin; cualquiera de estas últimas contiene siempre una 2-grieta de Luzin. La prueba del hecho en cuestión requiere invocar el *Lema de Fodor (ver REFE)* y el hecho de que siempre existen funciones ordinales como las solicitadas en la subsecuente prueba.

**Proposición 1.4.16.** *Toda familia de Luzin contiene una grieta de Luzin. En consecuencia, existe una grieta de Luzin.*

**Demuestra&on.** Sea  $\mathcal{A} = \{A_\alpha \mid \alpha \in \omega_1\}$  una familia de Luzin y  $f, g : \omega_1 \rightarrow \omega_1$  tales que si  $\beta < \alpha < \omega_1$ , entonces  $g(\beta) < f(\beta) < g(\alpha)$ .

Como  $\omega_1 \setminus \omega$  es estacionario en  $\omega_1$  y la asignación  $j : \omega_1 \setminus \omega \rightarrow \omega_1$ ; dada por  $j(\alpha) = \max(A_{f(\alpha)} \cap A_{g(\alpha)}) + 1$ , es regresiva, en virtud del Lema de Fodor, existen  $S \subseteq \omega_1 \setminus \omega$  estacionario en  $\omega_1$  y un natural  $m$  tales que  $j[S] \subseteq \{m\}$ .

Ahora, si  $\beta < \alpha$ , entonces debido a la hipótesis  $f(\beta) < g(\alpha)$ , de modo que  $f[\{\beta < \alpha \mid A_{f(\beta)} \cap A_{g(\alpha)} \subseteq m\}] \subseteq \{\gamma < g(\alpha) \mid A_{g(\alpha)} \subseteq m\}$ . Como  $\mathcal{A}$  es de Luzin y  $f$  es inyectiva (por ser estrictamente creciente),  $\{\beta < \alpha \mid A_{f(\beta)} \cap A_{g(\alpha)} \subseteq m\}$  es

finito, permitiendo la buena definición de  $l : S \rightarrow \omega_1$ , definida por medio de la siguiente regla de correspondencia:

$$l(\alpha) = \begin{cases} 0 & ; \forall \gamma < \alpha (A_{f(\gamma)} \cap A_{g(\alpha)} \not\subseteq m) \\ \max\{\gamma < \alpha \mid A_{f(\gamma)} \cap A_{g(\alpha)} \subseteq m\} & ; \text{ otro caso} \end{cases}$$

Como  $0 \notin S$ ,  $l$  es regresiva; nuevamente, del Lema de Fodor, se sigue la existencia de un conjunto  $X \subseteq S$ , estacionario en  $\omega_1$ , tal que  $l$  es constante en  $X$ . Así, para cada  $\alpha \in X$  se tiene que  $m = \max(A_{f(\alpha)} \cap A_{g(\alpha)}) + 1$  y en consecuencia  $A_{f(\alpha)} \cap A_{g(\alpha)} \subseteq m$ , pues  $X \subseteq S$  y  $j[S] \subseteq \{m\}$ .

Ahora, supóngase que  $\beta, \alpha \in X$  y  $\beta < \alpha$ , como  $l$  es constante en  $X$ ,  $l(\alpha) = l(\beta)$ . Si este último valor es cero, entonces  $A_{f(\beta)} \cap A_{g(\alpha)} \not\subseteq m$ . En caso contrario:

$$0 \neq l(\alpha) = l(\beta) < \beta < \alpha,$$

y como  $l(\alpha) < \beta < \alpha$ , la definición de  $l$  obliga a que  $A_{f(\beta)} \cap A_{g(\alpha)} \not\subseteq m$ . Lo anterior demuestra que  $(\{A_{f(\alpha)} \mid \alpha \in X\}, \{A_{g(\alpha)} \mid \alpha \in X\})$  es una grieta de Luzin (con testigos  $X$  y  $m$ ) contenida en  $\mathcal{A}$ . ■

### 1.4.3. Lema de Solovay

**Definición 1.4.17.** Sea  $\mathcal{A}$  una familia casi ajena. El **orden basado en  $\mathcal{A}$**  es el par  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}} := ([\omega]^{<\omega} \times [\mathcal{A}]^{<\omega}, \leq_{\mathcal{A}})$ ; donde:  $(p, P) \leq_{\mathcal{A}} (h, H)$  si y sólo si  $h \subseteq p$ ,  $H \subseteq P$  y  $p \setminus h \subseteq \omega \setminus \bigcup H$ .

Cuando el contexto sea claro, se escribirá  $\leq$  en vez de  $\leq_{\mathcal{A}}$ .

Habrá de verificarse que el orden basado en  $\mathcal{A}$  es, en efecto, un orden parcial. Claramente es una relación reflexiva y antisimétrica. Ahora, si  $(p, P) \leq (h, H)$  y  $(h, H) \leq (k, K)$ , es inmediato a la definición de  $\leq_{\mathcal{A}}$  que  $k \subseteq h \subseteq p$  y  $K \subseteq H \subseteq P$ ; en consecuencia  $k \subseteq p$  y  $K \subseteq P$ . Además  $p \setminus h \subseteq \omega \setminus \bigcup H$  y  $h \setminus k \subseteq \omega \setminus \bigcup K$ , resultando en que:

$$p \setminus k \subseteq (h \setminus k) \cup (p \setminus h) \subseteq (\omega \setminus \bigcup K) \cup (\omega \setminus \bigcup H);$$

lo cual demuestra  $p \setminus k \subseteq \omega \setminus \bigcup K$ . Luego  $\leq$  es transitiva, y con ello, orden parcial.

En términos sumamente intuitivos,  $(p, P) \leq (h, H)$  significa que « $h$  se extiende a  $p$  y  $H$  a  $P$ ». Así, conforme  $H \subseteq \mathcal{A}$  «crece», se aproxima a  $\mathcal{A}$ . Dado que, conforme  $h$  «crece», este se «aproxima» a un subconjunto casi ajeno con  $\bigcup H$ ; y eventualmente, se formará un subconjunto casi ajeno con  $\bigcup \mathcal{A}$ .

Para dar una formalización de la intuición recién dada, comenzaremos definiendo los siguientes objetos para todo lo que resta de la sección.

- i) Para cada  $a \in \mathcal{A}$ ,  $D_a := \{(p, P) \in \mathbb{P}_{\mathcal{A}} \mid a \in P\}$ .
- ii) Si  $G \subseteq \mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ , se define  $D_G := \bigcup \{h \subseteq \omega \mid \exists H \in [\omega]^\omega ((h, H) \in G)\}$ .

El siguiente Lema indica por qué la existencia de ciertos filtros en  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$  genera conjuntos casi ajenos con cada elemento de  $\mathcal{A}$ ; es decir, se implica bajo esta condición, la no maximalidad de la familia.

**Lema 1.4.18.** *Sean  $\mathcal{A}$  una familia casi ajena, y  $G$  un filtro de  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ , entonces para cada  $a \in \mathcal{A}$ :*

- i)  $D_a$  es denso en  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ .
- ii) Si  $G \cap D_a \neq \emptyset$ ; entonces,  $D_G \cap a$  es finito.

**Demarcación.** (i) Si  $a \in \mathcal{A}$  y  $(p, P) \in \mathbb{P}_{\mathcal{A}}$  son elementos arbitrarios, entonces  $(p, P \cup \{a\}) \in D_a$  y además, por 1.4.17,  $(p, P \cup \{a\}) \leq (p, P)$ .

(ii) Supóngase que  $(p, P) \in G \cap D_a$  y sea  $x \in D_G \cap a$  cualquier elemento. Por definición de  $D_G$ , existe  $(h, H) \in G$  de modo que  $x \in h$ . Y por ser  $G$  filtro,  $(k, K) \leq (p, P), (h, H)$  para cierto  $(k, K) \in G$ . De esto, particularmente se obtiene que  $h \subseteq k$ ,  $k \setminus p \subseteq \omega \setminus \bigcup P$ .

Ahora, como  $(p, P) \in D_a$ , entonces como  $a \in P$ . En consecuencia, se tiene que  $x \in \bigcup P$ . Finalmente,  $x \in h \subseteq k$ , así que  $x \in k \cap \bigcup P$ , lo cual obliga a que  $x \in p$ . Por tanto  $D_G \cap a \subseteq p =^* \emptyset$ . ■

Se tiene entonces lo subsecuente de forma inmediata:

**Corolario 1.4.19.** Sean  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$  y  $\mathcal{D} := \{D_a \mid a \in \mathcal{A}\}$ . Si existe un filtro  $\mathcal{D}$ -genérico,  $\mathcal{A}$  no es maximal.

Debido a lo recién mostrado, de tener  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$  la c.c.c. (**ver PRELIMS**), se satisfaría que  $MA(|\mathcal{A}|)$  implica  $\mathcal{A} \notin MAD(\omega)$ . En tal caso, se estaría probando que si  $MA(\kappa)$  es cierto, entonces  $\kappa < \alpha$ ; por ello,  $\mathfrak{m} \leq \alpha$ .

Y en efecto, si  $\mathcal{A} \subseteq \mathbb{P}_{\mathcal{A}}$  es anticadena y  $(p, P), (h, H) \in \mathcal{A}$ , se tiene  $p \neq h$ ; sino  $(p, P \cup H) \leq (p, P), (h, H)$  y  $\mathcal{A}$  dejaría de ser anticadena. En consecuencia  $|\mathcal{A}| \leq |[\omega]^{<\omega}| = \aleph_0$  y  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$  tiene la c.c.c.

**Corolario 1.4.20.** Si  $\kappa \geq \omega$  y  $MA(\kappa)$ , entonces  $\kappa < \alpha$ ; así que:

- i)  $\mathfrak{m} \leq \alpha$ .
- ii) Bajo  $MA + \neg CH$  se tiene  $\mathfrak{m} = \alpha = \mathfrak{c}$ .
- iii) ZFC no demuestra la implicación  $\alpha = \mathfrak{c} \rightarrow CH$ .

**Demostración.** Los puntos (i) y (ii) son inmediatos. Para (iii) únicamente basta recordar que  $MA + \neg CH$  es consistente con ZFC (consúltese [7, p. 279-281]). ■

El [Corolario 1.4.19](#) es una inmediatez, dada toda su discusión previa. Una versión bastante más fortalecida de este, es el siguiente resultado mostrado por Robert Solovay.

**Lema 1.4.21** (Solovay). Sean  $\kappa$  un cardinal con  $\omega \leq \kappa < \mathfrak{c}$  y  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$  una grieta tal que  $|\mathcal{A}|, |\mathcal{B}| \leq \kappa$ . Bajo  $MA(\kappa)$ ; existe  $D \subseteq \mathcal{A}$  de modo que para cualesquiera  $A \in \mathcal{A}$  y  $b \in \mathcal{B}$  ocurre  $a \cap D =^* \emptyset$  y  $b \cap D \neq^* \emptyset$ .

**Demostración.** Supóngase  $MA(\kappa)$  y para cada  $(b, n) \in \mathcal{B} \times \omega$ , definase el conjunto  $D(b, n) := \{(h, H) \in \mathbb{P}_{\mathcal{A}} \mid h \cap b \not\subseteq n\}$ .

Sea  $(p, P) \in \mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ ; por la [Proposición 1.4.6](#)  $b \notin \mathcal{I}(\mathcal{A})$ , luego  $b \setminus \bigcup P$  es infinito. Por ello, existe  $m \in \omega$  de modo que  $n + 1 \in m$  y  $m \in b \setminus \bigcup P \subseteq \omega \setminus \bigcup P$ ; así,

$p \cup \{m\}$  es finito,  $(p \cup \{m\}, P) \in D(b, n)$  y  $(p \cup \{m\}, P) \leq_{\mathcal{A}} (p, P)$ . Por lo tanto, cada  $D(b, n)$  es denso en  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ .

Sea  $\mathcal{D} = \{D(b, n) \mid (b, n) \in \mathcal{B} \times \omega\} \cup \{D_a \mid a \in \mathcal{A}\}$  y obsérvese que  $\mathcal{D}$  es una familia de densos de  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$  de cardinalidad menor o igual a  $\kappa$ . Como  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$  es c.c.c., de MA( $\kappa$ ) se desprende la existencia de un filtro  $G$  en  $\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ ,  $\mathcal{D}$ -genérico. Se afirma que  $D_G$  es el conjunto buscado.

En efecto, por 1.4.18 se tiene que para cada  $a \in \mathcal{A}$ , el conjunto  $D_G \cap a$  es finito. Ahora, si  $b \in \mathcal{B}$  es cualquiera, para cada  $n \in \omega$  existe  $(k, K) \in G \cap D(b, n)$ ; y en consecuencia  $D_G \cap b \not\subseteq n$  (pues  $h \cap b \not\subseteq n$ ). Por lo que el conujunto  $D_G \cap b$  no puede ser finito. ■

Es deseable que la conclusión del Lema de Solovay fuese que la grieta  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$  está separada; sin embargo tal formulación desemboca en un resultado falaz. Suponiendo MA +  $\neg$ CH, la existencia de una familia de Luzin (véase 1.4.11) sería testigo de tal falsedad; pues esta tiene tamaño  $\aleph_1 < \mathfrak{c}$  y es inseparable.

Como «breviario cultural», cuando una grieta  $(\mathcal{A}, \mathcal{B})$  satisface la conclusión de 1.4.21 para cierto subconjunto  $D \subseteq \omega$ , se dirá que está *débilmente separada* (siguiendo la terminología de [2, § 3.2]).

La siguiente es una aplicación típica del lema de Solovay, una prueba sencilla de la consistencia, respecto a ZFC, del enunciado  $2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_1}$  (la moderadamente famosa *Hipótesis de Jones*). Como se podrá verificar en secciones futuras de este escrito, tanto la hipótesis de Jones, como su negación, tendrán repercusiones en el comportamiento topológico de los  $\Psi$ -espacios; especialmente, en la relación que estos guardan con la Conjetura de Moore (véase Subsección 4.1.1).

Aprovechamos para mencionar una última aplicación «conjuntista» de la combinatoria de las familias casi ajena; a través de ellas, se puede mostrar la consistencia de la Hipótesis de Jones con ZFC.

**Corolario 1.4.22.** *Sea  $\kappa$  un cardinal con  $\omega \leq \kappa < \mathfrak{c}$ , entonces bajo MA( $\kappa$ ), se tiene  $2^\kappa = \mathfrak{c}$ .*

*Consecuentemente, es consistente con ZFC que  $2^{\aleph_0} = 2^{\aleph_1}$*

**Demotración.** Sea  $\kappa$  un cardinal con  $\omega \leq \kappa < \mathfrak{c}$  y supóngase MA( $\kappa$ ). Tomando en cuenta 1.2.6, fíjese una familia casi ajena  $\mathcal{A}$  con  $|\mathcal{A}| = \kappa$  y defínase la función  $f : \mathcal{P}(\omega) \rightarrow \mathcal{P}(\mathcal{A})$  como  $f(X) = \{b \in \mathcal{A} \mid b \cap X =^* \emptyset\}$ .

Si  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{A}$  es cualquiera, entonces  $|\mathcal{A} \setminus \mathcal{B}|, |\mathcal{B}| \leq \kappa$  y por el Lema de Solovay (1.4.21) se concluye la existencia de un separador  $D \subseteq \omega$  para  $\mathcal{A} \setminus \mathcal{B}$  y  $\mathcal{B}$ . Esto resulta en que  $f(D) = \{b \in \mathcal{A} \mid b \cap X =^* \emptyset\} = \mathcal{B}$ . Luego  $f$  es sobreyectiva y  $\mathfrak{c} \geq 2^\kappa$ . Como además  $\kappa \geq \aleph_0$ , entonces  $2^\kappa \geq 2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$ .

Para la segunda parte, es suficiente notar que  $\text{MA} + \neg\text{CH}$  es consistente con ZFC, y que a partir de ellos se concluye  $\text{MA}(\aleph_1)$  y  $\omega \leq \aleph_1 < \mathfrak{c}$ . ■

## 2 Espacios de Isbell-Mrówka

Cada  $\Psi$ -espacio, denotado por  $\Psi(\mathcal{A})$ , está completamente determinado por una familia de subconjuntos  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$ . Estos espacios cuentan con un lugar privilegiado en la topología de conjuntos; quizás, el mayor motivo de ello es su versatilidad para la búsqueda de ejemplos. Esta virtud tiene por razón a las múltiples «traducciones» que existen entre los invariantes topológicos de  $\Psi(\mathcal{A})$  y las propiedades que tiene la familia  $\mathcal{A}$  como conjunto.

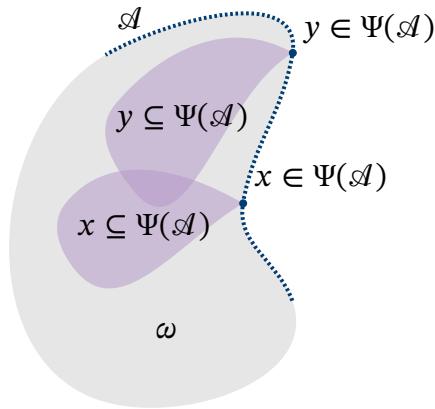
En este capítulo se definirá la topología de  $\Psi(\mathcal{A})$  y se analizarán sus propiedades más básicas. Se probarán equivalencias para: su metrizabilidad en relación al tamaño de  $\mathcal{A}$ , la compactidad de sus subespacios a través del ideal  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ , su pseudocompacidad en términos de la maximalidad de  $\mathcal{A}$ , entre otras propiedades topológicas. En adición a lo anterior, se probará que los únicos espacios infinitos, de Hausdorff, separables y hereditariamente localmente compactos, son «salvo homeomorfismos» los espacios de Mrówka; esto es, el Teorema de Kannan y Rajagopalan.

### 2.1. $\Psi$ -espacios y caracterizaciones elementales

Una forma amigable de «visualizar» a los  $\Psi$ -espacios es concibiéndolos como una generalización al espacio de ordinales  $X = \omega + 1$ , este se estructura de forma que el subespacio  $\omega \subseteq X$  es denso, discreto y se acumula «hacia» el punto  $\omega \in X$ . Los espacios  $\Psi(\mathcal{A})$  tienen por conjunto subyacente a  $\omega \cup \mathcal{A}$  y, en un sentido puramente intuitivo, se puede describir su topología de la siguiente manera: el subconjunto  $\omega$  es una «masa» densa y discreta, pero, se acumula en «direcciones» independientes entre sí, una por cada elemento en  $\mathcal{A}$ . Cada  $x \in \mathcal{A}$ , pensado como subespacio de  $\Psi(\mathcal{A})$ , forma una sucesión convergente al punto  $x \in \Psi(\mathcal{A})$ .

Para conseguir el comportamiento anterior, bastará considerar que un subconjunto  $U$  de  $\Psi(\mathcal{A}) = \omega \cup \mathcal{A}$  es abierto si y solamente si casi contiene a sus elementos que estén en  $\mathcal{A}$ . De esta manera, cuando  $x \in \mathcal{A}$  pertenezca a un

abierto  $U$ , se tendrá  $x \subseteq^* U$ : y así  $x$  como subconjunto del espacio, convergerá a  $x$  como punto del espacio.



**Figura 2.1.1:** Imagen intuitiva de  $\Psi(\mathcal{A})$ .

Es fundamental notar la importancia de que  $\omega \cap \mathcal{A}$  sea vacía. Pese a que en general, si  $N$  es un conjunto numerable arbitrario y  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$ , no hay garantía de que  $N \cap \mathcal{A} = \emptyset$ ; utilizando las biyecciones  $\Phi_h$ , es posible trasladar la familia  $\mathcal{A}$  hacia una familia sobre  $\omega$  que tenga «las mismas propiedades». Por ello se convendrá, sin perder generalidad, lo que sigue:

**Consideración 2.1.2.** *Cuando  $N$  sea un conjunto numerable y  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$ , a partir de este momento, se asumirá siempre que  $N \cap \mathcal{A} = \emptyset$ .*

Bajo la consideración previa, para cualquier conjunto numerable  $N$  y familia de subconjuntos  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$ , se define la colección:

$$\mathcal{T}_{N,\mathcal{A}} := \{U \subseteq N \cup \mathcal{A} \mid \forall x \in U \cap \mathcal{A} (x \subseteq^* U)\}. \quad (2.1)$$

Tal colección forma una topología para  $N \cup \mathcal{A}$ . Evidentemente  $\emptyset$  y  $N \cup \mathcal{A}$  son elementos de  $\mathcal{T}_{\mathcal{A}}$ . Si  $U, V \in \mathcal{T}_{\mathcal{A}}$  y  $x \in (U \cap V) \cap \mathcal{A}$ , entonces  $x \subseteq^* U$  y  $x \subseteq^* V$ , de donde  $x \subseteq^* U \cap V$  y  $U \cap V \in \mathcal{T}_{N,\mathcal{A}}$ . Finalmente, si  $\mathcal{U} \subseteq \mathcal{T}_{\mathcal{A}}$  y  $x \in \bigcup \mathcal{U} \cap \mathcal{A}$ , existe  $U_0 \in \mathcal{U}$  con  $x \in U_0$ ; así que  $x \subseteq^* U_0 \subseteq \bigcup \mathcal{U}$  y por ello  $\bigcup \mathcal{U} \in \mathcal{T}_{\mathcal{A}}$ .

**Definición 2.1.3.** Sean  $N$  un conjunto numerable y  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$ .

- i)  $\mathcal{T}_{N,\mathcal{A}}$  es la **topología de Isbell-Mrówka generada por  $\mathcal{A}$** .
- ii) El  **$\Psi$ -espacio generado por  $\mathcal{A}$**  es el par  $\Psi_N(\mathcal{A}) = (N \cup \mathcal{A}, \mathcal{T}_{N,\mathcal{A}})$ .

Si  $N = \omega$ , los objetos anteriores se denominarán por  $\mathcal{T}_\mathcal{A}$  y  $\Psi(\mathcal{A})$ , respectivamente.

Desde un punto de vista topológico, lo anterior no define dos clases distintas de objetos. Por tal motivo, bastará de ahora en más, estudiar los  $\Psi$ -espacios generados por familias de subconjuntos infinitos de  $\omega$ .

**Proposición 2.1.4.** Sean  $N, M$  conjuntos numerables,  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$  y cualquier biyección  $h : N \rightarrow M$ . Entonces  $\Psi_N(\mathcal{A}) \cong \Psi_M(\Phi_h(\mathcal{A}))$ .

**Demuestra.** Sea  $f : \Psi_N(\mathcal{A}) \rightarrow \Psi_M(\Phi_h(\mathcal{A}))$  dada por  $f(x) = h(x)$ , si  $x \in N$ ; y  $f(x) = h[x]$ , si  $x \in \mathcal{A}$ . Nótese que  $f$  es biyectiva «dada 2.1.2». Por definición de  $f$ , y como  $\Phi_h^{-1} = \Phi_{h^{-1}}$ , basta ver únicamente la continuidad de  $f$ .

Sea  $U$  abierto en  $\Psi_M(\Phi_h(\mathcal{A}))$  y supóngase que  $x \in f^{-1}[U] \cap \mathcal{A}$ . Entonces  $f(x) = h[x] \in U \cap \Phi_h(\mathcal{A})$ . Como  $U$  es abierto en  $\Psi_M(\Phi_h(\mathcal{A}))$ , entonces  $f(x) \setminus U$  es finito. Así que  $f^{-1}[f(x) \setminus U] = h^{-1}[h[x]] \setminus f^{-1}[U] = x \setminus f^{-1}[U]$  es finito y así  $x \subseteq^* f^{-1}[U]$ , probando que  $f^{-1}[U]$  es abierto en  $\Psi_N(\mathcal{A})$ . ■

La siguiente manera de describir la topología de Mrówka es la más común en la literatura «como ejemplo de ello, [3] o [2]».

**Proposición 2.1.5.** Sea  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$ , entonces:

- i) Cada  $B \subseteq \omega$  es abierto en  $\Psi(\mathcal{A})$ , así, cada  $n \in \omega$  es punto aislado.
- ii) Si  $x \in \mathcal{A}$ ,  $\mathcal{B}_x := \{\{x\} \cup x \setminus F \mid F \in [x]^{<\omega}\}$  es base local de  $x$  en  $\Psi(\mathcal{A})$ .

**Demuestra.** (i) Si  $B \subseteq \omega$ , es vacío que  $B \in \mathcal{T}_\mathcal{A}$ , pues  $B \cap \mathcal{A} = \emptyset$ .

(ii) Sea  $x \in \mathcal{A}$ . Si  $G \subseteq x$  es finito y  $y \in (\{x\} \cup x \setminus G) \cap \mathcal{A}$ , necesariamente  $y = x$ , de donde  $y \subseteq^* \{x\} \cup x \setminus G$  pues  $G$  es finito, así  $\{x\} \cup x \setminus G \in \mathcal{T}_{\mathcal{A}}$ , por lo que  $\mathcal{B}_x \subseteq \mathcal{T}_{\mathcal{A}}$ . Ahora, si  $U \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  es abierto y  $x \in U$ ,  $F := x \setminus U \subseteq x$  es finito y  $x \in \{x\} \cup x \setminus F \subseteq U$ . ■

En términos de lo recién demostrado, cada  $\mathcal{B}_x$  es imagen de  $[x]^{<\omega}$ . Pero este último conjunto es numerable, pues  $x$  es lo es. Por lo tanto, se desprende:

**Corolario 2.1.6.** *Para cualquier familia  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$ :*

- i)  $\Psi(\mathcal{A})$  es 1 AN.
- ii)  $\mathcal{B}_{\mathcal{A}} := \bigcup \{\mathcal{B}_x \mid x \in \mathcal{A}\} \cup \{\{n\} \mid n \in \omega\}$  es una base de  $\Psi_N(\mathcal{A})$
- iii) El peso de  $\Psi(\mathcal{A})$  es  $\aleph_0 + |\mathcal{A}|$ .
- iv)  $\Psi(\mathcal{A})$  es 2 AN si y sólo si  $|\mathcal{A}| \leq \aleph_0$ .

**Demostración.** Basta probar únicamente (iii).

Debido a (ii), el peso del espacio es menor o igual a  $|\mathcal{B}_{\mathcal{A}}| = \aleph_0 + |\mathcal{A}|$ . Además,  $\omega, \mathcal{A} \subseteq \Psi(\omega)$  son subespacios discretos «véase el Lema 2.1.7» de tamaño, y por tanto peso,  $\aleph_0$  y  $|\mathcal{A}|$ , respectivamente. Consecuentemente, el peso de  $\Psi(\mathcal{A})$  debe ser mayor o igual a ambos. ■

Si  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$  y  $X \subseteq \Psi(\mathcal{A})$ , dado que cada punto de  $\omega$  es aislado, se tiene que  $\text{der}(X) \subseteq \mathcal{A}$ . Por otra parte, si  $a \in \mathcal{A}$ , la única forma de que cada  $a \setminus F$  «con  $F \in [a]^{<\omega}$ » tenga intersección no vacía con  $X$ , es que  $X \cap a$  sea infinito. Esta argumentación junto con 2.1.5 demuestran el primer punto, y con ello el resto, del siguiente Lema:

**Lema 2.1.7.** *Sea  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$ , entonces:*

- i) Si  $X \subseteq \Psi(\mathcal{A})$ , entonces  $\text{der}(X) = \{y \in \mathcal{A} \mid X \cap y \neq^* \emptyset\}$ .
- ii)  $\mathcal{A} = \text{der}(\Psi(\mathcal{A})) = \text{der}(\omega)$ .

- iii) Cada  $B \subseteq \mathcal{A}$  es un subespacio cerrado y discreto de  $\Psi(\mathcal{A})$ .
- iv)  $\omega$  es discreto, denso en  $\Psi(\mathcal{A})$ .
- v)  $B \subseteq \omega$  es cerrado si y sólo si es casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ .

Las siguientes son propiedades topológicas inherentes a todo  $\Psi$ -espacio.

**Proposición 2.1.8.** *Todo  $\Psi$ -espacio es separable, primero numerable,  $T_1$ , disperso y desarrollable.*

**Demarcación.** Sea  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$  cualquiera. El  $\Psi$ -espacio generado por  $\mathcal{A}$  es separable pues  $\omega$  es denso en  $\Psi(\mathcal{A})$  y numerable; además, este espacio es primero numerable debido al Corolario 2.1.6.

(Axioma  $T_1$ ) Sea  $x \in \Psi(\mathcal{A})$ . De 2.1.7,  $\text{der}(\{x\}) = \{y \in \mathcal{A} \mid \{x\} \cap y \neq^* \emptyset\} = \emptyset$ , lo cual implica que  $\{x\}$  es cerrado.

(Dispersión) Supóngase que  $X \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  es no vacío. Si  $X \subseteq \mathcal{A}$ , cada  $x \in X$  es aislado en el discreto  $X$ . «inciso (iii) de 2.1.7». En caso contrario, existe un elemento  $n \in X \cap \omega$  y  $n$  es aislado en  $X$ , pues  $\{n\}$  es abierto en  $\Psi(\mathcal{A})$  y en  $X$ .

(Desarrollabilidad) Defínase  $\mathcal{U}_n := \{\{a\} \cup a \setminus n \mid a \in \mathcal{A}\} \cup \{\{y\} \mid y \in \omega\}$  para cada  $n \in \omega$ . Así, cada  $\mathcal{U}_n$  es cubierta abierta de  $\Psi(\mathcal{A})$ . Sean  $x \in \Psi(\mathcal{A})$  y  $U$  un abierto tal que  $x \in U$ .

Si  $x \in \omega$ , entonces ningún  $V \in \mathcal{U}_{x+1}$ , con  $x \in V$ , puede ser de la forma  $\{a\} \cup a \setminus (x+1)$ . Por tanto,  $x \in \{x\} = \text{St}(x, \mathcal{U}_{x+1}) \subseteq U$ . Si  $x \in \mathcal{A}$ , entonces  $x \setminus U \subseteq \omega$  es finito y existe  $n_0 \in \omega$  tal que  $x \setminus U \subseteq n_0$ . Como  $\{x\} \cup x \setminus n_0 \in \mathcal{U}_{n_0}$  es el único abierto de  $\mathcal{U}_{n_0}$  al cual  $x$  pertenece,  $x \in \{x\} \cup x \setminus n_0 = \text{St}(x, \mathcal{U}_{n_0}) \subseteq U$ .

Así pues,  $\{\text{St}(x, \mathcal{U}_n) \mid n \in \omega\}$  es base local de  $x$ , mostrando que  $\{\mathcal{U}_n \mid n \in \omega\}$  es un desarrollo para  $\Psi(\mathcal{A})$ . ■

Cuando la familia  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$  no es casi ajena, el espacio  $\Psi(\mathcal{A})$  no satisface el axioma de separación de Hausdorff. Es por tal razón, que en la literatura se suele dar la Definición 2.1.3 partiendo directamente de una familia casi ajena «el lector podrá corroborar esto en textos como [2, 3, 6]».

A continuación se muestran aquellas propiedades topológicas de  $\Psi(\mathcal{A})$  «codificadas» a través de la condición  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$ .

**Proposición 2.1.9.** Para cada  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$ , son equivalentes:

- i)  $\mathcal{A}$  es familia casi ajena.
- ii)  $\Psi(\mathcal{A})$  es cero-dimensional.
- iii)  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Tychonoff.
- iv)  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Hausdorff.

**Demostración.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Si  $\mathcal{A}$  es familia casi ajena, como  $\Psi(\mathcal{A})$  es  $T_1$ , basta verificar que cada elemento de la base  $\mathcal{B}_{\mathcal{A}}$  «definida como en 2.1.6» es cerrado. En efecto, cada  $\{n\}$  con  $n \in \omega$  es cerrado pues  $\Psi(\mathcal{A})$  es  $T_1$ . Y dados  $x \in \mathcal{A}$  y  $F \subseteq x$  finto, haciendo uso de 2.1.7 se tiene que por ser  $\mathcal{A}$  familia casi ajena,  $\text{der}(\{x\} \cup x \setminus F) = \{x\} \subseteq \{x\} \cup x \setminus F$ . Así que  $\{x\} \cup x \setminus F$  es cerrado.

(ii)  $\rightarrow$  (iii)  $\rightarrow$  (iv) Si  $\Psi(\mathcal{A})$  es cero-dimensional, al ser espacio  $T_1$ , resulta ser de Tychonoff (ver PRELIMS). Y, si  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Tychonoff, entonces es de Hausdorff.

(iv)  $\rightarrow$  (i) Si  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Hausdorff y  $x, y \in \mathcal{A}$  son distintos, existen abiertos ajenos  $U, V \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  tales que  $x \in U$  y  $y \in V$ . De donde  $x \subseteq^* U$ ,  $y \subseteq^* V$  y por consiguiente  $x \cap y \subseteq^* U \cap V = \emptyset$ . ■

La Proposición anterior es el motivo principal por el cual nos restringiremos a considerar únicamente  $\Psi$ -espacios generados por familias casi ajenas, es decir, espacios de Mrówka.

**Definición 2.1.10.** Un **espacio de Mrówka** (o, **de Isbell-Mrówka**) es un  $\Psi$ -espacio generado por una familia casi ajena.

Recordando que un espacio topológico es de Moore si y sólo si satisface el axioma  $T_3$  y tiene un desarrollo, se tiene la siguiente compilación básica respecto a las propiedades con las que siempre cuenta un espacio de Mrówka.

**Corolario 2.1.11.** *Todo espacio de Mrówka es separable, primero numerable, de Tychonoff, cero-dimensional, disperso y de Moore.*

La siguiente es sólo una de las múltiples relaciones importantes que existen entre los espacios de Mrówka y el conjunto de Cantor. Su demostración se basa en un hecho conocido en topología general; todo espacio cero-dimensional de peso  $\kappa$  se encaja en  $2^\kappa$  (véase [1, Teo. 8.5.11, p. 299]).

**Corolario 2.1.12.** *Todo espacio de Mrówka  $\Psi(\mathcal{A})$  se encaja en  $2^{\aleph_0 + |\mathcal{A}|}$ . Particularmente, si  $|\mathcal{A}| \leq \aleph_0$ , el espacio  $\Psi(\mathcal{A})$  se encaja en  $2^\omega$  y es metrizable.*

## 2.2. Compacidad y compacidad local

Surgen más «traducciones» con las cuales maniobrar al momento de estudiar los  $\Psi$ -espacios. El ideal generado por una familia casi ajena determina a los subespacios compactos del espacio de Mrówka asociado a la misma.

**Proposición 2.2.1.** *Sean  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$  y  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$ . Entonces  $K$  es compacto si y sólo si  $K \cap \omega \subseteq^* \bigcup(K \cap \mathcal{A})$  y  $K \cap \mathcal{A}$  es finito.*

**Demarcación.** Si  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  es subespacio compacto; en virtud de que la colección  $\mathcal{U} := \{\{n\} \mid n \in K \cap \omega\} \cup \{\{x\} \cup x \mid x \in K \cap \mathcal{A}\}$  es cubierta abierta para  $K$  en  $\Psi(\mathcal{A})$ , existen  $F \subseteq K \cap \omega$  y  $G \subseteq K \cap \mathcal{A}$  finitos de manera tal que  $\{\{n\} \mid n \in F\} \cup \{\{x\} \cup x \mid x \in G\}$  es subcubierta de  $\mathcal{U}$ . Necesariamente  $K \cap \mathcal{A} = G$ , así que  $K \cap \mathcal{A}$  es finito. Además  $(K \cap \omega) \setminus \bigcup G = K \setminus \bigcup G \subseteq F$  es finito y con ello  $K \cap \omega \subseteq^* \bigcup(K \cap \mathcal{A})$ .

Conversamente, supóngase que  $K \cap \omega \subseteq^* \bigcup(K \cap \mathcal{A})$  y que  $K \cap \mathcal{A}$  es finito. Para cada  $y \in \mathcal{A}$ ,  $\{y\} \cup y$  es compacto; por ello  $L := \bigcup \{\{y\} \cup y \mid y \in K \cap \mathcal{A}\}$  es un subespacio compacto de  $\Psi(\mathcal{A})$ . Nótese que  $K \cap L$  es cerrado en  $L$ ; pues  $L \setminus K \subseteq \omega$ ; así que  $K \cap L \subseteq L$  es compacto. Como  $K \setminus L = (K \cap \omega) \setminus \bigcup(K \cap \mathcal{A})$  es finito por hipótesis, es compacto. Así,  $K = (K \setminus L) \cup (K \cap L)$  es unión de subespacios compactos de  $\Psi(\mathcal{A})$ , y por lo tanto, es compacto. ■

Entonces los subespacios compactos de  $\Psi(\mathcal{A})$  son aquellos de la forma  $M \cup H$ ; donde  $H \subseteq \mathcal{A}$  es finito y  $M \subseteq^* \bigcup H$ . Esto es, si  $\mathcal{K}$  es el conjunto de todos los subespacios compactos de  $\Psi(\mathcal{A})$ :

$$\mathcal{K} = \bigcup_{H \in [\mathcal{A}]^{<\omega}} \{(F \cup M) \cup H \mid (F, M) \in [\omega]^{<\omega} \times \mathcal{P}(H)\}$$

Por ello  $|\mathcal{A}| \cdot \aleph_0 \leq |\mathcal{K}| \leq \sum\{(\aleph_0 \cdot \mathfrak{c}) \mid H \in [\mathcal{A}]^{<\omega}\} \leq |\mathcal{A}| \cdot \mathfrak{c} \leq \mathfrak{c}$  y todo espacio de Mrówka tiene; a lo sumo,  $\mathfrak{c}$  subespacios compactos.

La discusión sobre cuántos subespacios compactos *importantes* «esto es, los que determinan el carácter topológico de su extensión unipuntual» tiene  $\Psi(\mathcal{A})$  se retomará en la [Sección 3.1](#).

**Corolario 2.2.2.** Sean  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$  y  $A \subseteq \omega$ . Son equivalentes:

- i)  $A \in \mathcal{J}(\mathcal{A})$
- ii) Existe  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  compacto tal que  $A \subseteq K$ .
- iii) Existe  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  compacto tal que  $A \subseteq^* K$ .

**Demuestra.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Si  $A \in \mathcal{J}(\mathcal{A})$ , existe cierto  $H \subseteq \mathcal{A}$  finito de modo tal que  $A \subseteq^* \bigcup H$ . Debido a [2.2.1](#),  $K := A \cup H$  es compacto y  $A \subseteq K$ .

(iii)  $\rightarrow$  (i) Supóngase que  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  es compacto y tal que  $A \subseteq^* K$ . Consecuentemente  $A \setminus \bigcup(K \cap \mathcal{A}) \subseteq^* A \setminus (K \cap \omega) = A \setminus K =^* \emptyset$ , en virtud de la [Proposición 2.2.1](#). Como  $K \cap \mathcal{A}$  es finito, resulta que  $A \in \mathcal{J}(\mathcal{A})$ . ■

**Proposición 2.2.3.** Para cualquier  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$  son equivalentes:

- i)  $\Psi(\mathcal{A})$  es compacto.
- ii)  $\Psi(\mathcal{A})$  es numerablemente compacto.
- iii)  $\mathcal{A}$  es finita y maximal.

**Democión.** (i)  $\rightarrow$  (ii) es clara.

(ii)  $\rightarrow$  (iii) Supóngase que  $\Psi(\mathcal{A})$  es numerablemente compacto. Dado que  $\mathcal{A}$  es un subespacio cerrado y discreto de  $\Psi(\mathcal{A})$  «véase 2.1.7»; necesariamente, debe ser finito. Luego,  $\mathcal{U} := \{\{n\} \mid n \in \omega\} \cup \{\{x\} \cup x \mid x \in \mathcal{A}\}$  es una cubierta numerable para  $\Psi(\mathcal{A})$ , y como este espacio es numerablemente compacto, existe  $F \subseteq \omega$  finito de tal modo que la colección  $\{\{n\} \mid n \in F\} \cup \{\{x\} \cup x \mid x \in \mathcal{A}\}$  es subcubierta de  $\mathcal{U}$ . Se obtiene de la finitud de  $F$  que  $\omega \subseteq^* \bigcup \mathcal{A}$ ; y al ser  $\mathcal{A}$  finita, del Corolario 1.1.9 se sigue su maximalidad.

(iii)  $\rightarrow$  (i) Si  $\mathcal{A}$  es finita y maximal, entonces de 1.3.5 se tiene que  $\omega \in \mathcal{I}(\mathcal{A})$ . Aplicando el Corolario 2.2.2 se tiene la compacidad de  $\Psi(\mathcal{A})$ . ■

La siguiente Proposición para nada carece de importancia, pues los espacios de Isbell-Mrówka son los únicos (dentro de cierta clase) con tal propiedad.

**Proposición 2.2.4.** *Todo espacio de Mrówka es hereditariamente localmente compacto, y en consecuencia, es espacio de Baire.*

**Democión.** Supóngase que  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$  y sea  $X \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  cualquiera. Como  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Hausdorff (recuérdese 2.1.11),  $X$  es de Hausdorff y basta verificar que cada punto de  $X$  tiene una vecindad en  $X$  compacta.

Sea  $x \in X$  arbitrario. Si  $x \in \omega$ ,  $\{x\}$  es vecindad compacta de  $x$  en  $X$ . Ahora, si  $x \in \mathcal{A}$ , entonces  $K := X \cap (\{x\} \cup x) \subseteq \{x\} \cup x$  es vecindad de  $x$  en  $X$ . En virtud de la Proposición 2.2.1,  $K$  es compacto; pues  $K \cap \mathcal{A} = \{x\}$  es finito y  $K \cap \omega \subseteq x \subseteq^* \bigcup \{x\} = \bigcup (K \cap \mathcal{A})$ . Así,  $X$  es localmente compacto.

Finalmente,  $\Psi(\mathcal{A})$  es localmente compacto y de Hausdorff, siendo esto suficiente para ser de Baire (Teorema de Categoría de Baire). ■

## 2.3. Metrizabilidad y Pseudocompacidad

El Corolario 2.1.12 evidencia que la numerabilidad de una familia casi ajena  $\mathcal{A}$  es suficiente para concluir la metrizabilidad de su espacio de Mrówka asociado, no resulta difícil notar que el recíproco también ocurre «dados 2.1.6 y que  $\Psi(\mathcal{A})$  es separable»; sin embargo, se tienen más equivalencias:

**Proposición 2.3.1.** *Sea  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$ , entonces son equivalentes:*

- i)  $\mathcal{A}$  es a lo más numerable
- ii)  $\Psi(\mathcal{A})$  es metrizable.
- iii)  $\Psi(\mathcal{A})$  es segundo numerable.
- iv)  $\Psi(\mathcal{A})$  es  $\sigma$ -compacto.
- v)  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Lindelöf.

**Demostración.** (i)  $\rightarrow$  (ii)  $\rightarrow$  (iii) Si  $|\mathcal{A}| \leq \omega$ , se obtiene de 2.1.12 que  $\Psi(\mathcal{A})$  es metrizable. Por otro lado, si  $\Psi(\mathcal{A})$  es metrizable, al ser este un espacio separable, se tiene garantizado que es 2 AN (MtzEq).

(iii)  $\rightarrow$  (iv)  $\rightarrow$  (v) Si  $\Psi(\mathcal{A})$  es 2 AN, entonces al localmente compacto, resulta que es  $\sigma$ -compacto (2AN, locComp implica sigma comp). Además; todo espacio  $\sigma$ -compacto, es también de Lindelöf. (sigma comp implica lind)

(v)  $\rightarrow$  (i) Por último, supóngase que  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Lindelöf. Como este espacio es desarollable, debe ser 2 AN (Lind Desr implica 2an). Se sigue del Corolario 2.1.6 que  $|\mathcal{A}| \leq \aleph_0$ . ■

El siguiente corolario es una sencilla aplicación de 2.2.3 y 2.3.1, ejemplos como este ilustran desde ya el poder «constructivo» que tienen estos espacios.

**Corolario 2.3.2.** *Sea  $\mathcal{A} \in \text{AD}(\omega)$ . Entonces  $\Psi(\mathcal{A})$  no compacto y metrizable (o cualquiera de sus equivalentes dados en 2.3.1) si y solamente si  $|\mathcal{A}| = \aleph_0$ .*

Ahora, falta establecer una relación entre  $\Psi(\mathcal{A})$  y la maximalidad de la familia  $\mathcal{A}$ . En la Sección 3.1 se ahondará con mucha más profundidad en el estudio de las sucesiones convergentes; pero de momento, es necesario considerar el siguiente Lema, en orden de dar una caracterización completa para la condición  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$ .

**Lema 2.3.3.** Sean  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$ ,  $x \in \mathcal{A}$  y  $B \in [\omega]^\omega$ . Entonces  $B \rightarrow x$  en  $\Psi(\mathcal{A})$  si y sólo si  $B \subseteq^* x$ .

**Demucción.** Supóngase que  $B \rightarrow x$  en  $\Psi(\mathcal{A})$ . Como  $x \cup \{x\}$  es un abierto de  $\Psi(\mathcal{A})$  que tiene a  $x$ , se tiene que  $B \subseteq^* x \cup \{x\} =^* x$ .

Recíprocamente, si  $B \subseteq^* x$  y  $U \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  es un abierto cualquiera tal que  $x \in U$ , resulta que  $x \subseteq^* U$ . Por lo tanto  $B \subseteq^* U$ , mostrando que  $B \rightarrow x$  en  $\Psi(\mathcal{A})$ . ■

**Proposición 2.3.4.** Sea  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$ , son equivalentes:

- i)  $\Psi(\mathcal{A})$  es pseudocompacto.
- ii)  $\mathcal{A}$  es maximal.
- iii) Todo subespacio discreto, abierto y cerrado de  $\Psi(\mathcal{A})$  es finito.
- iv) Toda sucesión en  $\omega$  tiene una subsucesión convergente.

**Demucción.** (i)  $\rightarrow$  (ii). Si  $\mathcal{A}$  no es maximal, existe  $B \subseteq \omega$  infinito y casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ . Por 2.1.5 y 2.1.7,  $B$  es discreto, abierto y cerrado, obteniéndose de (Ree A) que  $\Psi(\mathcal{A})$  no es pseudocompacto.

(ii)  $\rightarrow$  (iii) Por contrapuesta, supóngase que existe  $B \subseteq \Psi(\mathcal{A})$ , abierto, cerrado, discreto e infinito. Como  $B$  es cerrado y discreto,  $\text{der}(B) = \emptyset$  y se obtiene del inciso (i) de 2.1.7 que  $B \subseteq \omega$ . Concluyéndose por el quinto inciso de tal Lema que  $B$  es casi ajeno con todo elemento de  $\mathcal{A}$ .

(iii)  $\rightarrow$  (iv) Supóngase (iii) y sea  $B \in [\omega]^\omega$ . Así,  $B$  es discreto, infinito y abierto. Por hipótesis,  $B$  no es cerrado y debe existir  $x \in \text{der}(B) \setminus B$  y por 2.1.11,  $x \in \mathcal{A}$  y  $B \cap x$  es infinito. Siguiéndose del Lema 2.1.7 que  $B \cap x \rightarrow x$  en  $\Psi(\mathcal{A})$ .

(iv)  $\rightarrow$  (i) Esta implicación se sigue inmediatamente de la caracterización para la pseudocompacidad dada en (Ree A). ■

Combinando 2.2.3, 2.3.1 y 2.3.4 se obtienen ejemplos muy concretos. Por ejemplo, si un espacio de Mrówka  $\Psi(\mathcal{A})$  no es pseudocompacto pero sí es metrizable, necesariamente  $\mathcal{A}$  es numerable. Otro ejemplo responde con una negativa a lo

que en su momento fue un problema popular: ¿la pseudocompacidad equivale a la compacidad numerable en espacios Tychonoff?, resultado se sabe cierto en la clase de espacios  $T_4$  (**Reee R**) y falso dentro de la clase de espacios que no son  $T_1$ . En virtud de [2.2.3](#), tomando cualquier familia maximal infinita:

**Corolario 2.3.5.** *Existe un espacio de Tychonoff, que es pseudocompacto pero no numerablemente compacto.*

La siguiente es una caracterización conocida (véase [10, p. 39, 45]), desvela que el comportamiento sumamente organizado de  $\Psi(\mathcal{A})$  se rompe bruscamente cuando  $\mathcal{A}$  deja de ser numerable.

**Proposición 2.3.6.** *Sea  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$  de cardinalidad  $\kappa$ , entonces<sup>1</sup>:*

- i) *Si  $\kappa = 0$ , entonces  $\Psi(\mathcal{A}) \cong \omega$ .*
- ii) *Si  $\kappa < \omega$  y  $\mathcal{A}$  no es maximal,  $\Psi(\mathcal{A}) \cong \omega \cdot (\kappa + 1)$ .*
- iii) *Si  $\kappa < \omega$  y  $\mathcal{A}$  es maximal,  $\Psi(\mathcal{A}) \cong \omega \cdot (\kappa + 1) + 1$ .*
- iv) *Si  $\kappa = \omega$ , entonces  $\Psi(\mathcal{A}) \cong \omega^2$ .*
- v) *Si  $\kappa > \omega$ , entonces  $\Psi(\mathcal{A})$  no homeomorfo a ningún espacio de ordinales; más aún,  $\Psi(\mathcal{A})$  no es linealmente ordenable.*

De (iv), en la Proposición previa, surge que el espacio de ordinales  $\omega^2$  es el único espacio de Mrówka metrizable y no compacto. Queda claro además, que cualesquiera dos familias numerables son «iguales» en el siguiente aspecto:

**Definición 2.3.7.** *Dados conjuntos  $N, M$  numerables, se dice que  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$  y  $\mathcal{B} \subseteq [M]^\omega$  son **esencialmente iguales** cuando  $\Psi_N(\mathcal{A}) \cong \Psi_M(\mathcal{B})$ .*

Una consecuencia «curiosa» en relación  $\omega^2$ , fruto de lo anterior y del Teorema principal de la [Sección 2.4](#), es el [Corolario 2.4.10](#).

---

<sup>1</sup>En los incisos (i)-(iv), los espacios homeomorfos a  $\Psi(\mathcal{A})$  son espacios de ordinales.

## 2.4. Teorema de Kannan y Rajagopalan

La meta primordial en lo que resta del capítulo será caracterizar aquellos espacios que son homeomorfos a algún espacio de Mrówka.

**Lema 2.4.1.** *Sea  $X$  un espacio de Hausdorff y localmente compacto. Si  $X$  contiene un abierto denso  $D \in [X]^{\leq\omega}$ , entonces  $N := X \setminus \text{der}(X)$  es denso en  $X$ .*

**Demotación.** Si  $x \in X$  es aislado en  $D$ , dada la densidad de  $D$ , es necesario que  $x \in D$ . Luego  $\{x\} = D \cap U$  para cierto abierto  $U$  de  $X$ ; y como  $X$  es un espacio  $T_1$ , resulta que  $U = \{x\}$ . Por lo tanto  $X \setminus \text{der}_D(D) \subseteq N$ .

Nótese que  $X \setminus \text{der}_D(D) = \bigcap \{X \setminus \{y\} \mid y \in \text{der}_D(D)\}$ . Pero, para cada punto  $y \in \text{der}_D(D) \subseteq \text{der}(X)$ , el conjunto  $X \setminus \{y\}$  es abierto y denso en  $X$ . De la hipótesis y el (TCB),  $X$  es de Baire, así que  $N \supseteq X \setminus \text{der}_D(D)$  debe ser denso. ■

**Lema 2.4.2.** *Sean  $X$  un espacio y  $N := X \setminus \text{der}(X)$ . Son equivalentes:*

- i)  $N$  es denso y cada  $y \in \text{der}(X)$  cumple que  $N \cup \{y\}$  es abierto en  $X$ .
- ii)  $\text{der}(X)$  es discreto.

**Demotación.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Supóngase (i) y sea  $y \in \text{der}(X)$ . Como  $N \cup \{y\}$  es abierto en  $X$ , entonces  $y \in U \subseteq N \cup \{y\}$  para cierto abierto  $U$ . Segundo de lo anterior,  $\{y\} = U \setminus N = U \cap \text{der}(X)$ . Mostrando que  $\text{der}(X)$  es discreto.

(ii)  $\rightarrow$  (i) Supóngase que  $\text{der}(X)$  es discreto. Si  $N$  no es denso, existen  $x \in X$  y un abierto  $U$  de modo tal que  $x \in U \subseteq \text{der}(X)$ . Pero al ser  $\text{der}(X)$  discreto,  $\{x\} = W \cap \text{der}(X)$  para cierto abierto  $W$ , de donde  $U \cap W = \{x\}$  y  $x \in N$ , esto es imposible. Así que  $N$  es denso en  $X$ .

Ahora, si  $y \in \text{der}(X)$ , ha de existir un abierto  $U$  tal que  $\{y\} = U \cap \text{der}(X)$ . De lo anterior,  $N \cup \{y\} = (N \cup U) \cap (N \cup \text{der}(X)) = N \cup U$  es abierto en  $X$ . ■

La siguiente caracterización es debida a Varadachariar Kannan y a Minakshi-sundaram Rajagopalan, quienes en 1970 (consúltese [6]) dieron con un resultado que permite caracterizar de una forma sencilla a los espacios de Mrówka. Su característica fundamental es la compacidad local hereditaria.

**Teorema 2.4.3 (Kannan, Rajagopalan)**

Para todo espacio  $X$  infinito, de Hausdorff y separable, son equivalentes:

- i)  $X$  es hereditariamente localmente compacto.
- ii)  $X$  es localmente compacto y  $\text{der}(X)$  es discreto.
- iii)  $X$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka.

**Demostración.** Supóngase que  $X$  es cualquier espacio infinito, de Hausdorff, separable y sea  $N := X \setminus \text{der}(X)$ .

(i)  $\rightarrow$  (ii) Supóngase que  $X$  es hereditariamente localmente compacto. Por separabilidad e infinitud de  $X$ , existe  $D \in [X]^\omega$  denso. Se sigue de la hipótesis que  $D$  es localmente compacto y por ello, es abierto en su cerradura,  $X$ . Debido al [Lema 2.4.1](#),  $N$  es denso en  $X$ .

Por otro lado, si  $y \in \text{der}(X)$  es cualquiera,  $N \cup \{y\} \subseteq X$  es localmente compacto, y por ende, es abierto en su cerradura. Pero  $N$  es denso, así que  $N \cup \{y\}$  es abierto en  $X = \text{cl}(N \cup \{y\})$ . Se sigue de [2.4.2](#) que  $\text{der}(X)$  es discreto.

(ii)  $\rightarrow$  (iii) Supóngase que  $X$  es localmente compacto y que  $\text{der}(X)$  es discreto. Por el [Lema 2.4.2](#) resulta que  $N$  es denso en  $X$  y que  $N \cup \{y\}$  es abierto siempre que  $y \in \text{der}(X)$ . Por ser  $X$  infinito y separable, se tiene que  $N$  es numerable. Utilizando la compacidad local de  $X$ , para cada  $x \in \text{der}(X)$  fíjese (AC) una vecindad compacta  $V_x$  de  $x$  en  $X$  contenida en  $N \cup \{x\}$ . Se afirma que  $\mathcal{A} = \{V_x \setminus \{x\} \subseteq N \mid x \in \text{der}(X)\} \in \text{AD}(N)$ .

En efecto, si  $x \in \text{der}(X)$  es cualquiera, entonces  $V_x \setminus \{x\}$  no es finito. De lo contrario,  $\{x\} = (N \cup \{x\}) \setminus (V_x \setminus \{x\})$  sería abierto en  $X$  (que es espacio  $T_1$ ) y se contradiría que  $x \in \text{der}(X)$ . Por tanto,  $\mathcal{A} \subseteq [N]^\omega$ . Además, si  $x, y \in \text{der}(X)$  son distintos, se tiene que  $V_x \cap V_y \subseteq N$ . Así  $V_x \cap V_y$  es subespacio compacto del discreto  $N$ , lo cual obliga a que sea finito. Como consecuencia,  $\mathcal{A}$  es familia casi ajena en  $N$ .

Defínase  $f : X \rightarrow \Psi_N(\mathcal{A})$  por medio de  $f(n) = n$  si  $n \in N$  y  $f(x) = V_x$  si  $x \in \text{der}(X)$ . Claramente  $f$  es función biyectiva; además, como  $N$  es el conjunto de puntos aislados de  $X$ , para verificar que  $f$  es homeomorfismo basta verificar lo siguiente.

*Afirmación.* Un subconjunto  $U \subseteq X$  es abierto si y sólo si para cada  $x \in U \cap \text{der}(X)$  se tiene  $V_x \setminus \{x\} \subseteq^* U$ .

*Demostración.* Sea  $U \subseteq X$ . Si  $U$  es abierto y  $x \in U \cap \text{der}(X)$  es cualquiera, entonces  $V_x \setminus U \subseteq N$  es cerrado en  $X$ , así en  $V_x$  y como  $V_x$  es compacto;  $V_x \setminus U$  es subespacio compacto del discreto  $N$ , por tanto finito. Así que  $V_x \setminus \{x\} \subseteq^* U$ .

Recíprocamente, supóngase que para cada  $x \in U \cap \text{der}(X)$  se tiene que  $V_x \setminus \{x\} \subseteq^* U$ , es decir, que  $V_x \setminus U$  es finito. Sea  $y \in U$  cualquiera, si  $y \in \text{der}(X)$  entonces  $V_y \setminus U$  es finito y con ello  $V_y \setminus (V_y \setminus U) \subseteq U$ , de donde  $U$  es vecindad de  $y$  (usando que  $X$  es espacio  $T_1$ ). Luego,  $U$  es vecindad de todos sus puntos, y por tanto, es abierto.  $\square$

(iii)  $\rightarrow$  (i) Si  $X$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka, las propiedades topológicas del último se satisfacen en  $X$ , siguiéndose de 2.2.4 que  $X$  es hereditariamente localmente compacto.  $\blacksquare$

Del resultado anterior es casi inmediata la obtención de las siguientes condiciones equivalentes.

**Corolario 2.4.4.** *Sea  $X$  cualquier espacio infinito, de Hausdorff y separable. Entonces las siguientes condiciones son equivalentes:*

- i)  *$X$  es pseudocompacto y hereditariamente localmente compacto.*
- ii)  *$X$  es regular,  $\text{der}(X)$  es subespacio discreto de  $X$  y cualquier subespacio discreto, abierto y cerrado a la vez en  $X$  es finito.*
- iii)  *$X$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka generado por una familia casi ajena maximal.*

**Demostración.** Por el Teorema de Kannan y Rajagopalan, lo demostrado en 2.3.4 y como todo espacio de Mrówka es de Tychonoff (véase 2.1.11); particularmente regular, bastará demostrar que si  $X$  satisface (ii) entonces  $X$  es localmente

compacto. Supóngase (ii), claramente cada punto aislado de  $X$  tiene una vecindad compacta en  $X$ .

Sea  $x \in \text{der}(X)$  arbitrario, como  $\text{der}(X)$  es discreto, existe  $U \subseteq X$  abierto con  $\{x\} = U \cap \text{der}(X)$ . Por regularidad de  $X$ , fíjese un abierto  $V$  tal que  $x \in V \subseteq \text{cl}(V) \subseteq U$  y nótese que entonces  $\{x\} = \text{cl}(V) \cap \text{der}(X)$ .

Si  $W$  es una vecindad abierta de  $x$ , entonces  $\text{cl}(V) \setminus W$  es discreto y abierto (por ser subespacio de  $X \setminus \text{der}(X)$ ) y cerrado (por ser intersección de cerrados). De (ii) se sigue la finitud de  $\text{cl}(V) \setminus W$ , y de esto, la compacidad de  $\text{cl}(V)$ , siendo tal subespacio, una vecindad compacta de  $x$  en  $X$ . ■

**Corolario 2.4.5.** *Sea  $X$  un espacio topológico infinito, entonces  $X$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka si y sólo si es homeomorfo a un subespacio abierto de un espacio de Mrówka.*

**Demostración.** Basta probar la necesidad. Supóngase que  $\mathcal{A}$  es una familia casi ajena y que  $U \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  es un abierto tal que  $X \cong U$ . Como  $X$  es infinito,  $U$  es infinito, además por ser  $\Psi(\mathcal{A})$  de Hausdorff y hereditariamente localmente compacto, se tiene que  $U$  es de Hausdorff y hereditariamente localmente compacto. Por último, como  $\omega$  es denso en  $\Psi(\mathcal{A})$  y  $U$  es abierto en  $\Psi(\mathcal{A})$ , se tiene que  $U \cap \omega$  es denso en  $U$ ; así que  $U$  es separable. De lo anterior  $U$ , y por tanto  $X$ , es homeomorfo a un espacio de Mrówka; a saber  $\Psi_{U \cap \omega}(U \cap \mathcal{A})$ . ■

**Corolario 2.4.6.** *Sea  $\{X_\alpha \mid \alpha \in \kappa\}$  una familia no vacía de espacios topológicos infinitos; sin pérdida de generalidad ajenos dos a dos, entonces son equivalentes:*

i)  $Y := \coprod_{\alpha \in \kappa} X_\alpha$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka.

ii)  $\kappa$  es contable y cada  $X_\alpha$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka.

**Demostración.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Supóngase que  $Y$  es espacio de Mrówka. Como cada  $X_\alpha \subseteq Y$  es infinito y abierto en  $Y$ , se sigue del Corolario anterior que  $X_\alpha$  es de

Mrówka. Por otro lado, si  $\kappa$  fuese más que numerable,  $Y$  no podía ser separable, pues es la suma de  $\kappa$  espacios no vacíos; así que  $\kappa$  es a lo más numerable.

(ii)  $\rightarrow$  (i) Supóngase que  $\kappa$  es a lo más numerable y para cada  $\alpha \in \kappa$ , el espacio  $X_\alpha$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka. Entonces, del [Sección 2.4](#), cada  $X_\alpha$  es (infinito) de Hausdorff, separable, localmente compacto y además el subespacio  $\text{der}_{X_\alpha}(X_\alpha) \subseteq X_\alpha$  es discreto.

La suma de espacios de Hausdorff (localmente compactos, respectivamente) es de Hausdorff (localmente compacta, respectivamente); además, por ser cada  $X_\alpha$  separable y  $\kappa$  a lo más numerable, resulta que  $Y$  es infinito, de Hausdorff, localmente compacto y separable.

Sea  $y \in \text{der}_Y(Y)$  cualquiera, por definición de  $Y$ , para el único elemento  $\alpha \in \kappa$  tal que  $y \in X_\alpha$ , se tiene  $y \in \text{der}_{X_\alpha}(X_\alpha)$ . Y como tal subespacio de  $X_\alpha$  es discreto, existe  $V \subseteq X_\alpha$  abierto tal que  $\{y\} = U \cap \text{der}_{X_\alpha}(X_\alpha)$ , pero  $U$  es abierto también en  $Y$  y además  $\{y\} = U \cap \text{der}_Y(Y)$ . De lo contrario, existe  $x \in V \cap \text{der}_Y(Y) \setminus \{y\}$  y consecuentemente  $x \notin \text{der}_{X_\alpha}(X_\alpha)$ , mostrando que  $\{x\}$  es abierto en  $X_\alpha$  y por tanto en  $Y$ , lo cual es absurdo dada la elección de  $X$ . Lo anterior prueba que  $\text{der}_Y(Y)$  es discreto, finalizando la prueba en virtud del [Teorema 2.4.3](#). ■

Se explotará mucho la siguiente observación durante el subsecuente Corolario, pues nuevamente, se hará uso del inciso (ii) del [Teorema 2.4.3](#).

**Observación 2.4.7.** *Sea  $X$  un espacio topológico,  $\text{der}(X)$  es discreto si y sólo si  $\text{der}^2(X) := \text{der}(\text{der}(X)) = \emptyset$ .*

*Efectivamente; como  $X \setminus \text{der}(X)$  es abierto,  $\text{der}(X)$  es discreto si y sólo si es discreto y cerrado. Esto último sucede únicamente cuando  $\text{der}_{\text{der}(X)}(\text{der}(X)) = \text{der}(X) \cap \text{der}^2(X) = \emptyset$ . Sin embargo, cualquier punto aislado en  $X$ , es aislado en  $\text{der}(X)$ , así que  $\text{der}^2(X) \subseteq \text{der}(X)$ ; por lo tanto,  $\text{der}(X)$  es discreto si y sólo si  $\text{der}^2(X) = \emptyset$ .*

**Lema 2.4.8.** *Sean  $X$  y  $Y$  espacios topológicos infinitos, entonces  $X \times Y$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka si y sólo si  $X$  y  $Y$  son de Mrówka y además  $X \cong \omega$  o  $Y \cong \omega$*

**Demostración.** Obsérvese la igualdad:

$$\begin{aligned}
 \text{der}_{X \times Y}^2(X \times Y) &= \text{der}_{X \times Y} \left( \text{der}_X(X) \times \text{cl}_Y(Y) \cup \text{cl}_X(X) \times \text{der}_Y(Y) \right) \\
 &= \text{der}_{X \times Y} \left( \text{der}_X(X) \times Y \cup X \times \text{der}_Y(Y) \right) \\
 &= \text{der}_{X \times Y} \left( \text{der}_X(X) \times Y \right) \cup \text{der}_{X \times Y} \left( X \times \text{der}_Y(Y) \right) \\
 &= \text{der}_X(\text{der}_X(X)) \times \text{cl}_Y(Y) \cup \text{cl}_X(\text{der}_X(X)) \times \text{der}_Y(Y) \cup \\
 &\quad \cup \text{der}_X(X) \times \text{cl}_Y(\text{der}_Y(Y)) \cup \text{cl}_X(X) \times \text{der}_Y(\text{der}_Y(Y)) \\
 &= \text{der}_X^2(X) \times Y \cup \text{der}_X(X) \times \text{der}_Y(Y) \cup X \times \text{der}_Y^2(Y)
 \end{aligned}$$

Puesto que  $X, Y \neq \emptyset$ , resulta que  $\text{der}_{X \times Y}^2(X \times Y)$  es vacío si y sólo si  $\text{der}_X^2(X) = \text{der}_Y^2(Y) = \text{der}_X(X) \times \text{der}_Y(Y) = \emptyset$ . Esto es, el subespacio  $\text{der}_{X \times Y}(X \times Y) \subseteq X \times Y$  es discreto si y sólo si los subespacios  $\text{der}_X(X)$  de  $X$  y  $\text{der}_Y(Y)$  de  $Y$  son discretos y además  $X$  es discreto o  $Y$  es discreto.

Como  $X, Y$  son infinitos,  $X \times Y$  es infinito, además las propiedades de separabilidad, axioma de separación de Hausdorff y local compactitud son propiedades finitamente productivas y finitamente factorizables. De esto último, lo comentando en el párrafo anterior, el hecho de que el único espacio de Mrówka discreto es  $\omega$  y el inciso (ii) del Teorema 2.4.3, se obtiene el resultado. ■

**Corolario 2.4.9.** *Sea  $\{X_\alpha \mid \alpha \in \kappa\}$  una familia no vacía de espacios topológicos infinitos; sin pérdida de generalidad ajenos dos a dos, entonces son equivalentes:*

- i)  $Y := \prod_{\alpha \in \kappa} X_\alpha$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka.
- ii)  $\kappa$  es finito, cada  $X_\alpha$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka y existe  $\beta_0 \in \kappa$  tal que si  $\alpha \in \kappa \setminus \{\beta_0\}$ , se tiene  $X_\alpha \cong \omega$ .

**Demostración.** Sin perder generalidad, tómese  $\kappa$  como un cardinal.

(i) → (ii) Supóngase que  $Y$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka, entonces  $Y$  es de Hausdorff, Separable y hereditariamente localmente compacto. Todas

las propiedades anteriores son factorizables, así que por el por el Teorema de Kannan y Rajagopalan ([Teorema 2.4.3](#)), cada  $X_\alpha$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka.

Ahora, por contradicción, supóngase  $\kappa \geq \omega$ . Entonces, existen  $P, Q \subseteq \kappa$  ajenos e infinitos, de donde:

$$Y = \prod_{\alpha \in \kappa} X_\alpha \cong \prod_{\alpha \in P} X_\alpha \times \prod_{\alpha \in Q} X_\alpha$$

siguiéndose del Lema previo que; sin pérdida de generalidad,  $\prod_{\alpha \in P} X_\alpha \cong \omega$ . Lo anterior conduce a un absurdo, pues como  $P$  es infinito y cada  $X_\alpha$  también, resulta que:

$$\left| \prod_{\alpha \in P} X_\alpha \right| = \prod_{\alpha \in P} |X_\alpha| \geq \prod_{\alpha \in P} \aleph_0 = \aleph_0^{|P|} \geq \aleph_0^{\aleph_0} > \aleph_0$$

imposibilitando que  $\prod_{\alpha \in P} X_\alpha \cong \omega$  sea biyectable con  $\omega$ . Así,  $\kappa < \omega$ .

Finalmente, si cada  $X_\alpha$  es homeomorfo a  $\omega$ , o  $\kappa = 1$ , (ii) se satisface. Supóngase pues que  $\kappa \geq 2$  y que existe  $\beta_0 \in \kappa$  con  $X_{\beta_0} \not\cong \omega$ . Dado que:

$$Y = \prod_{\alpha \in \kappa} X_\alpha \cong X_{\beta_0} \times \prod_{\alpha \in \kappa \setminus \{\beta_0\}} X_\alpha$$

se sigue del Lema Previo que  $\prod_{\alpha \in \kappa \setminus \{\beta_0\}} X_\alpha \cong \omega$ . Siendo así, cada  $X_\alpha$  (con  $\alpha \in \kappa \setminus \{\beta_0\}$ ) infinito, numerable y discreto; esto es, homeomorfo a  $\omega$ .

(ii) → (i) Supóngase que  $\kappa$  es finito, que cada  $X_\alpha$  es homeomorfo a un espacio de Mrówka y que  $\beta_0 \in \kappa$  es un elemento tal que si  $\alpha \in \kappa \setminus \{\beta_0\}$ , entonces  $X_\alpha \cong \omega$ . Como  $\kappa \setminus \{\beta\}$  es finito, entonces:

$$Y = \prod_{\alpha \in \kappa} X_\alpha \cong X_\beta \times \prod_{\alpha \in \kappa \setminus \{\beta\}} X_\alpha \cong X_\beta \times \prod_{\alpha \in \kappa \setminus \{\beta\}} \omega = X_\beta \times \omega$$

y a consecuencia del Lema previo,  $Y$  es de Mrówka. ■

El siguiente Corolario del Teorema de Kannan y Rajagopalan ([Teorema 2.4.3](#)), es un resultado sencillo (y sumamente particular) de metrización.

**Corolario 2.4.10.** Si  $X$  es infinito, separable, de Hausdorff y hereditariamente localmente compacto. Entonces son equivalentes:

- i)  $X$  es hereditariamente separable.
- ii)  $X$  es metrizable.

**Demostración.** Dado el Teorema 2.4.3 y la caracterización 2.3.1, basta ver que si  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$ , entonces  $\Psi(\mathcal{A})$  es hereditariamente separable si y sólo si  $\mathcal{A}$  es a lo más numerable.

Para la suficiencia procédase por contrapuesta suponiendo que  $\mathcal{A}$  es más que numerable, entonces  $\mathcal{A}$  es un subespacio de  $\Psi(\mathcal{A})$  discreto y más que numerable, con lo que, no puede ser separable. Para la necesidad, si  $\mathcal{A}$  es a lo más numerable, cada subespacio de  $\Psi(\mathcal{A})$  es a lo más numerable, y con ello, separable. ■

La curiosidad (comentada posteriormente a 2.3.6) en relación al espacio de ordinales  $\omega^2$  tiene su justificación en el anterior Corolario.

Se finalizará la sección; y con ello el actual capítulo, dando un Corolario importante en relación a las imágenes continuas de los espacios de Mrówka pseudocompactos.

**Corolario 2.4.11.** Sea  $X$  infinito y de Hausdorff. Son equivalentes:

- i) Existe un denso  $D \subseteq X$  de  $X$  numerable tal que cada sucesión en  $D$  tiene una subsucesión convergente en  $X$ .
- ii)  $X$  es imagen continua de un espacio de Mrówka generado por una familia maximal.

**Demostración.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Supóngase (ii) y sea  $S \subseteq AD(D)$  el conjunto de familias casi ajenas en  $D$  tales que para cada  $\mathcal{B} \in S$ , cada elemento de  $\mathcal{B}$  es imagen de una sucesión en  $D$  convergente en  $X$ . Como  $D$  es numerable, existe una biyección  $f_0 : \omega \rightarrow D$  biyectiva, misma que admite una subsucesión convergente, a saber  $g_0 : \omega \rightarrow D$  convergente en  $X$ . Se desprende que  $\{\text{ima}(g_0)\} \in S$  y por tanto

$S$  es no vacío, siguiéndose de una aplicación del Principio de Maximalidad de Hausdorff (similar al utilizado en 1.1.10) la existencia de una familia casi ajena en  $D$ ,  $\mathcal{A} \subseteq \bigcup S$  tal que si  $\mathcal{B} \in S$  y  $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{B}$ , entonces  $\mathcal{A} = \mathcal{B}$ .

*Afirmación.*  $\mathcal{A}$  es familia casi ajena maximal sobre  $D$ .

*Demuestração.* Obsérvese primero que si  $A \in \mathcal{A}$ , existe  $C \in S$  tal que  $A \in C$  tal que  $A \in C$ ; consecuentemente  $A$  es imagen de una sucesión en  $D$  convergente en  $X$ ; es decir  $A \in \mathcal{A}$ . Ahora, si  $B \subseteq D$  infinito, entonces existe una biyección  $f : \omega \rightarrow B$  y, por hipótesis, existe  $g : \omega \rightarrow B \subseteq D$  subsucesión de  $f$ , convergente en  $X$  y con ello  $\{\text{ima}(g)\} \in S$ .

Por un lado, si  $\mathcal{A} \cup \{\text{ima}(g)\}$  no es casi ajena, existe  $A \in \mathcal{A}$  de modo que  $A \cap \text{ima}(g)$  es infinito, y con ello  $A \cap B$  es infinito. De otro modo,  $\mathcal{A} \cup \{\text{ima}(g)\} \in S$  y por la construcción de  $A$  se tiene  $\mathcal{A} \cup \{\text{ima}(g)\} = \mathcal{A}$ , siendo  $A := \text{ima}(g) \in \mathcal{A}$  tal que  $A \cap B$  es infinito (pues  $g$  es subsucesión de  $f$ ). Lo anterior prueba que  $\mathcal{A}$  es maximal sobre  $D$ .  $\square$

Para cada  $A \in \mathcal{A}$  fíjese (AC) una sucesión  $f_A : \omega \rightarrow D$  convergente a  $x_A$  en  $X$  tal que  $A = \text{ima}(f_A)$ . Nótese que, como  $X$  es de Hausdorff tal elemento  $x_A$  es el único al cual  $f_A$  converge. Además, dado que los elementos de  $\mathcal{A}$  son casi ajenos dos a dos, y de nuevo por ser  $X$  de Hausdorff, cada vez que  $A, B \in \mathcal{A}$  sean distintos, se tendrá que  $f_A \neq f_B$  y  $x_A \neq x_B$ . Definase la función  $p : \Psi_D(\mathcal{A}) \rightarrow X$  como  $p(d) = d$  si  $d \in D$  y  $p(A) = x_A$  si  $A \in \mathcal{A}$ , veamos que  $p$  es continua y sobreyectiva.

Sea  $U \subseteq X$  abierto en  $X$  y supóngase que  $A \in p^{-1}[U] \cap \mathcal{A}$  es cualquiera, entonces  $p(A) = x_A \in U$  y  $A = \text{ima}(f_A)$ . Como  $U$  es un abierto de  $X$  y  $f_A$  converge a  $x_A$  en  $X$ , resulta que  $\text{ima}(f_A) \subseteq^* U$  y con ello  $A \subseteq^* p^{-1}[U]$ ; así que  $p^{-1}[U]$  es abierto en  $\Psi_D(\mathcal{A})$ , y por tanto  $p$  es continua.

Ahora, sea  $x \in X \setminus D$  cualquier elemento. Por contradicción, supóngase que  $x \notin \text{ima}(p)$ , entonces si  $s : \omega \rightarrow D$  es cualquiera,  $s$  no puede converger a  $x$  en  $X$ ; de lo contrario, existe  $A \in \mathcal{A}$  tal que  $A \cap \text{ima}(s)$  es infinito y con ello  $f_A$  converge a  $x$  en  $X$ , con lo que  $x = p(A)$ . Sin embargo

AQUÍ ESTO YA NO SALE

(ii)  $\rightarrow$  (i) SALE FÁCIL



**Corolario 2.4.12.** *Todo espacio metrizable, separable y compacto es imagen continua de un espacio de Mrówka; en particular, el cubo de Hilbert  $[0, 1]^\omega$  y el conjunto de Cantor  $2^\omega$ .*

# 3 El compacto de Franklin

*Se comenzará introduciendo los espacios conocidos como compactos de Franklin, que no son más que la extensión unipuntual (de Alexandroff) de los espacios de Mrówka, si estos son no compactos.*

*Se logrará caracterizar cuándo estos espacios satisfacen con la propiedad de Fréchet; objetivo que requerirá los conocimientos obtenidos en el primer capítulo de este trabajo de tesis y nociones básicas sobre espacios secuenciales y de Fréchet. Durante el proceso de tal caracterización, se resolverá de paso un problema que estuvo sin solución en ZFC durante cierta parte del siglo pasado; la productividad finita de la propiedad de Fréchet.*

## 3.1. Sucesiones en $\mathcal{F}(\mathcal{A})$

**Definición 3.1.1.** *Sea  $\mathcal{A} \subseteq [\omega]^\omega$  cualquiera. El **compacto de Franklin generado por  $\mathcal{A}$**  es la extensión unipuntual del  $\Psi$ -espacio generado por  $\mathcal{A}$ , se denota por  $\mathcal{F}(\mathcal{A}) := \Psi(\mathcal{A}) \cup \{\infty_{\mathcal{A}}\}$ .*

*Cuando el contexto así lo permita, se omitirá el subíndice “ $_{\mathcal{A}}$ ” y se denominará el punto al infinito simplemente por  $\infty$ .*

Dado que un espacio topológico no compacto admite compactaciones Hausdorff únicamente cuando es Tychonoff y localmente compacto (véase [1, p. 221]), el compacto de Franklin resulta ser la compactación de Alexandroff de  $\Psi(\mathcal{A})$  únicamente cuando  $\mathcal{A}$  sea una familia casi ajena, lo que garantiza que  $\Psi(\mathcal{A})$  sea de Tychonoff; y sea *no compacta* (es decir, que no sea simultáneamente finita y maximal), lo cual obliga a que  $\Psi(\mathcal{A})$  sea no compacto; a razón de la [Proposición 2.2.3](#).

Por ello; y salvo se diga lo contrario, se convendrá que  $\mathcal{A}$  es una familia (casi

ajena) no compacta. Y más allá de esto, en pos de aligerar la notación de las futuras pruebas del capítulo, es menester convenir:

**Consideración 3.1.2.** *Durante esta sección:*

- i) *Para cada subespacio compacto  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$ , se denotará por  $V(K)$  a la vecindad abierta de  $\infty: \{\infty\} \cup \Psi(\mathcal{A}) \setminus K$  (como  $\Psi(\mathcal{A})$  es Hausdorff, todos los abiertos al rededor de  $\infty$  son de esta forma).*
- ii) *Se utilizarán casi en exceso los resultados obtenidos en 2.2.1 y 2.2.2, así que no se referenciarán de ahora en más.*
- iii) *Todas las convergencias y operadores que aparezcan sin subíndices se asumirán en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ . En caso de aparecer éstos en otros espacios, esto se indicará en sus subíndices.*

Lo primero a observar es lo siguiente: dado que  $\Psi(\mathcal{A})$  no es compacto, al ser un espacio de Tychonoff y localmente compacto, se tiene efectivamente que  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es de Hausdorff, compacto (en consecuencia, normal). Como es previsible, ciertas propiedades de  $\Psi(\mathcal{A})$  influyen en la topología de  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ ; como ejemplo inmediato, la separabilidad se preserva.

**Observación 3.1.3.** *Sea  $\mathcal{A}$  una familia casi ajena. Entonces el espacio  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es de Hausdorff, compacto, normal, localmente compacto, separable y disperso.*

Comparando con el [Corolario 2.1.11](#) con las observaciones recién hechas, vale mencionar que existen propiedades  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  que tienen una dependencia más compleja con  $\Psi(\mathcal{A})$ . Entre ellas, todas las que tengan relación a las sucesiones.

**Proposición 3.1.4.** *Sea  $\mathcal{A}$  una familia no compacta. Entonces el carácter de  $\infty$  en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es exactamente  $\aleph_0 + |\mathcal{A}|$ .*

**Demostración.** Es evidente que  $\aleph_0 \leq \chi(\infty, \mathcal{F}(\mathcal{A}))$ . Ahora, sea  $\mathcal{B}$  una base local de  $\infty$  en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ . Para cada  $y \in \mathcal{A}$  fíjese un elemento  $B_y \in \mathcal{B}$  de modo que  $B_y \subseteq$

$V(y \cup \{y\})$  (recuérdese que  $y \cup \{y\}$  es compacto). Obsérvese que la asignación  $y \mapsto B_y$  es inyectiva; pues, si  $x, y \in \mathcal{A}$  son distintos, entonces  $B_x \subseteq U(x \cup \{x\})$  y  $B_y \subseteq U(y \cup \{y\})$ , de donde  $x \in B_y \setminus B_x$ . Por lo tanto  $|\mathcal{A}| \leq |\mathcal{B}|$ , y en consecuencia  $\aleph_0 + |\mathcal{A}| \leq \chi(\infty, \mathcal{F}(\mathcal{A}))$ .

Para la desigualdad recíproca definase:

$$\mathcal{B} = \{V(h \cup (B \cup \bigcup h)) \mid (h, B) \in [\mathcal{A}]^{<\omega} \times [\omega]^{<\omega}\}$$

y nótese que  $\mathcal{B}$  es un conjunto de vecindades de  $\infty$  en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ .

Si  $K$  es cualquier subespacio compacto de  $\Psi(\mathcal{A})$ , entonces los conjuntos  $K \cap \mathcal{A} \subseteq \mathcal{A}$  y  $G := (K \cap \omega) \setminus \bigcup(K \cap \mathcal{A}) \subseteq \omega$  son finitos; consecuentemente  $V((K \cap \mathcal{A}) \cup (G \cup \bigcup(K \cap \mathcal{A}))) \subseteq U$ . Mostrando que  $\mathcal{B}$  es base local para  $\infty$  en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ ; y además  $|\mathcal{B}| \leq |[\mathcal{A}]^{<\omega} \times [\omega]^{<\omega}| \leq |\mathcal{A}| \cdot \aleph_0 = \aleph_0 + |\mathcal{A}|$ . Lo anterior prueba que  $\chi(\infty, \mathcal{F}(\mathcal{A})) \leq \aleph_0 + |\mathcal{A}|$ . ■

El siguiente Corolario se puede enriquecer con 2.3.1.

**Corolario 3.1.5.** *Para toda familia no compacta  $\mathcal{A}$ , el espacio  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es primero numerable si y sólo si  $|\mathcal{A}| \leq \aleph_0$ .*

El próximo Lema es clave por varios motivos; entre ellos, responde a una pregunta que sugiere la discusión previa al Corolario 1.3.11 ¿qué distingue a los subconjuntos de  $\omega$  casi ajenos con cada elemento de una familia casi ajena con aquellos en su parte positiva?

**Lema 3.1.6.** *Sean  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$  y  $B \subseteq \Psi(\mathcal{A})$ , entonces:*

- i) *Si  $B$  es numerable,  $B \rightarrow \infty$  si y sólo si  $B \subseteq^* \mathcal{A}$ , o  $B \cap \omega$  es infinito y casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ .*
- ii)  *$\infty \in cl(B)$  si y sólo si  $B \cap \mathcal{A}$  es infinito, o  $B \cap \omega \in \mathcal{J}^+(\mathcal{A})$ .*

**Demostración.** (i) Supóngase que  $B$  es numerable. Pruébese la suficiencia por contradicción; esto es, asúmase que  $B \rightarrow \infty$  pero  $B \not\subseteq^* \mathcal{A}$  ( $B \cap \mathcal{A}$  es infinito) y

que existe cierto  $a \in \mathcal{A}$  cuya intersección con  $B \cap \omega$  es infinita. Como  $B \rightarrow \infty$  y  $a \cap B = a \cap (B \cap \omega) \subseteq B$  es infinito, ocurre que  $a \cap B \rightarrow \infty$ . Sin embargo,  $a \cap B \subseteq a$  es infinito y a razón del Lema 2.3.3 se tiene que  $a \rightarrow a$  en  $\Psi(\mathcal{A})$ ; así mismo en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ . Lo anterior implica que  $a \cap B \rightarrow a$  y  $a \cap B \rightarrow \infty$ , siendo esto un absurdo.

Conversamente, si  $B \not\rightarrow \infty$ , existe un compacto  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  de modo que  $B \not\subseteq^* U_K$ ; esto es,  $B \cap K$  es infinito. Como  $K \cap \mathcal{A}$  es finito, lo anterior prueba que  $B \cap \omega \subseteq (B \cap \omega) \cap K$  es infinito, y así mismo,  $B \not\subseteq^* \mathcal{A}$ . Además  $C := (B \cap \omega) \cap K$  es un elemento en  $\mathcal{J}(\mathcal{A})$ ; a consecuencia de esto y lo comentado antes de 1.3.11, existe cierto  $a \in A$  con  $C \cap a$  infinito; de donde,  $B \cap a$  es infinito.

(ii) Para la suficiencia, supóngase que  $\infty \in \text{cl}(B)$  y que  $B \cap \mathcal{A}$  es finito. Resulta necesario que  $\infty \in \text{cl}(B \cap \omega)$  y con ello  $B \cap \omega \not\rightarrow \mathcal{J}(\mathcal{A})$ . En efecto; de lo contrario,  $B \cap \omega$  sería compacto y por ello lo tanto  $\infty \in \text{cl}(B \cap \omega) \subseteq B$ , lo cual es imposible pues  $\infty \notin \Psi(\mathcal{A})$ . Así que  $B \cap \omega \in \mathcal{J}^+(\mathcal{A})$ .

Para la necesidad, sí  $B \cap \mathcal{A}$  es infinito, existe  $C \subseteq B \cap \mathcal{A}$  numerable y por el inciso anterior  $C \rightarrow \infty$ , de donde  $\infty \in \text{cl}(C) \subseteq \text{cl}(B)$ . Por otra parte, si  $B \cap \omega \in \mathcal{J}^+(\mathcal{A})$  y  $K \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  es compacto, resulta que  $B \cap \omega \not\subseteq K$  y con ello  $B \cap U_K \neq \emptyset$ , mostrando que  $\infty \in \text{cl}(B)$ . ■

Si  $\mathcal{A}$  es una familia casi ajena maximal e infinita, entonces la condición (i) del Teorema anterior implica que las únicas sucesiones convergentes a  $\infty$  son únicamente las (infinitas) contenidas en  $\mathcal{A}$ ; por ello:

**Corolario 3.1.7.** *Supóngase que  $\mathcal{A}$  es una familia casi ajena maximal e infinita, entonces para cada  $X \in [\mathcal{F}(\mathcal{A})]^\omega$ :*

- i) *X es convergente si y sólo si  $X \subseteq^* \mathcal{A}$ , o, para algun  $a \in \mathcal{A}$  se tiene que  $X \subseteq^* a$ .*
- ii) *Si  $X \subseteq \omega$  y  $x \in \omega \cup \{\infty\}$ , entonces  $X \not\rightarrow x$ .*
- iii) *Si  $B \subseteq \omega \cap \text{sqcl}(X)$ , entonces  $B \subseteq X$ .*

**Demostración.** (i) Sea  $X \in [\mathcal{F}(\mathcal{A})]^\omega$  cualquiera. El recíproco es inmediato a razón de 2.3.3 y el Lema previo. Para la suficiencia asúmase que  $X \rightarrow x$  en el

compacto de Franklin. Si  $x = \infty$ , se sigue del lema anterior y la maximalidad de  $\mathcal{A}$  que  $X \subseteq^* \mathcal{A}$ . En otro caso, se puede suponer sin pérdida de generalidad que  $X \subseteq \Psi(\mathcal{A})$ , siguiéndose de 2.3.3 que  $X$  debe estar casi contenido en algún elemento de  $\mathcal{A}$ .

(ii) y (iii) Se desprenden inmediatamente del inciso (i) y de que cada punto en  $\omega$  es aislado (por lo que las sucesiones convergentes a puntos de  $\omega$  son eventualmente constantes).  $\blacksquare$

**Corolario 3.1.8.** *Sea  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$  infinita, entonces el orden secuencial de  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es 2.*

**Demuestra.** Nótese que  $\text{sqcl}^2(\omega) \not\subseteq \text{sqcl}(\omega)$ . Efectivamente; dado el Corolario anterior,  $\text{sqcl}(\omega) = \omega \cup \mathcal{A}$ . Más aún, como  $\mathcal{A}$  es infinita, contiene cierto subconjunto numerable  $B \subseteq \mathcal{A}$ . Y se obtiene de 3.1.6 que  $B \rightarrow \infty$ , esto muestra que  $\infty \in \text{sqcl}^2(\omega) \setminus \text{sqcl}(\omega)$ , por lo que  $O_{\text{sq}}(\mathcal{F}(\mathcal{A})) \geq 2$ .

Ahora, sea  $X \subseteq \mathcal{F}(\mathcal{A})$  cualquiera y supóngase que  $x \in \text{sqcl}^3(X)$ . Como  $\Psi(\mathcal{A})$  tiene orden secuencial 1 (pues es 1 AN, consecuentemente de Fréchet), es requisito que  $x = \infty$ . Así, existe  $A \subseteq \text{sqcl}^2(X)$  numerable tal que  $A \rightarrow \infty$  en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ . Por el Lema 3.1.6, sin pérdida de generalidad,  $A \subseteq \mathcal{A}$ . Para cada  $a \in A$  fíjese un conjunto numerable  $B_a \subseteq \text{sqcl}(X)$  de modo que  $B_a \rightarrow a$ . Se afirma que  $\text{sqcl}(X) \cap \mathcal{A}$  es infinito.

Supóngase lo contrario, es decir,  $\text{sqcl}(X) \subseteq^* \omega$ . Como cada  $B_a \subseteq X$  es convergente, se puede asumir sin pérdida de generalidad que  $B_a \subseteq \omega$ . En consecuencia de lo anterior,  $B_a \subseteq \omega \cap \text{sqcl}(X)$  y se obtiene del inciso (iii) del Corolario anterior que  $B_a \subseteq X$ . Así  $A \subseteq \text{sqcl}(X)$  ya que cada  $B_a$  satisface  $B_a \rightarrow a \in A$ . Esto muestra que  $x \in \text{sqcl}(\text{sqcl}(X)) = \text{sqcl}^2(X)$ . Es decir,  $\text{sqcl}^3(X) \subseteq \text{sqcl}^2(X)$  y  $O_{\text{sq}}(\mathcal{F}(\mathcal{A})) \leq 2$ .  $\blacksquare$

El posterior Teorema sigue la línea del Teorema de Kannan y Rajagopalan (Teorema 2.4.3), es una caracterización en propiedades topológicas de ciertos compactos de Franklin.

**Teorema 3.1.9**

Sea  $X$  un espacio topológico infinito.  $X$  es homeomorfo a un compacto de Franklin generado por una familia maximal infinita si y sólo si se satisfacen:

- i)  $X$  es compacto, de Hausdorff y separable, y
- ii) Existe  $x_0 \in X$  tal que  $x_0$  es el único punto de acumulación de  $\text{der}(X)$ , y, para cada  $B \in [X \setminus \text{der}(X)]^\omega$  se tiene  $B \not\ni x_0$ .

Claramente, en tal caso  $x_0$  se identifica bajo algún homeomorfismo con el punto al infinito del compacto de Franklin.

**Demostración.** Para la suficiencia basta suponer que  $X = \mathcal{F}(\mathcal{A})$ ; con  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$  infinita, y probar (ii). Sea  $x_0 := \infty$ . Por ser  $X$  la compactación unipuntual de  $\Psi(\mathcal{A})$ , se tiene que  $\Psi(\mathcal{A})$  es un denso de  $X$  y por ello  $\text{der}(X) = \{\infty\} \cup \text{der}_{\Psi(\mathcal{A})}(\Psi(\mathcal{A}))$ . De lo anterior y 2.1.7 se tiene que  $\text{der}(X) = \{\infty\} \cup \mathcal{A}$ ; y además que  $\mathcal{A}$  es discreto. En consecuencia,  $\text{der}_{\text{der}(X)}(\text{der}(X)) \subseteq \{\infty\}$  y la contención recíproca ocurre; pues cada subespacio compacto de  $\Psi(\mathcal{A})$  tiene intersección finita; particularmente no vacía, con el conjunto (infinito)  $\mathcal{A}$ . Por lo que  $\text{der}(X)$  sólo se acumula en  $x_0 = \infty$ . Ahora, si  $B \in [X \setminus \text{der}(X)]^\omega$ , entonces  $B \subseteq \omega$  y por la maximalidad de  $\mathcal{A}$ , se obtiene que  $B \not\ni \infty$  (utilizando el Corolario 3.1.7).

Véase ahora la necesidad; esto es, supóngase que es compacto, de Hausdorff, separable y que  $x_0$  actúa tal cual dicta (ii). Defínase  $Y := X \setminus \{x_0\}$ , se mostrará primero que  $Y \cong \Psi(\mathcal{A})$  para alguna familia maximal  $\mathcal{A}$ . Efectivamente, nótese que  $Y$  es infinito, de Hausdorff y separable (ya que  $Y$  es abierto al ser  $\{x_0\}$  cerrado); así que haciendo uso del Corolario 2.4.4, es suficiente mostrar los siguientes tres puntos:

( $Y$  es regular) Dado que  $X$  es compacto, de Hausdorff es normal y particularmente, regular. Esto prueba que  $Y \subseteq X$  es regular.

( $\text{der}_Y(Y)$  es discreto) Efectivamente, si  $y \in \text{der}_Y(Y)$  es cualquiera, entonces  $y \in Y$  es punto de acumulación de  $X$ . Como  $y \neq x_0$  y  $x_0$  es el único punto de acumulación de  $\text{der}_X(X)$ ,  $\{y\}$  es abierto en  $\text{der}_X(X)$ ; y por tanto,  $\{y\}$  es abierto en  $\text{der}_Y(Y)$ . Mostrando que  $\text{der}_Y(Y)$  es discreto.

(Si  $B \subseteq Y$  es discreto, abierto y cerrado a la vez, entonces  $B$  es finito) Supónga-

se que  $B \subseteq Y$  es discreto, abierto y cerrado a la vez. Por ser  $B$  discreto y abierto, se da  $B \subseteq X \setminus \text{der}(X)$ . Ahora, si  $B$  es infinito (sin pérdida de generalidad, numerable) se tiene de la hipótesis que  $B \not\ni x_0$ ; así, existe una vecindad de  $x_0$ ; a saber  $U$ , de modo que  $B \setminus U$  es infinito. Sin embargo,  $B \cap U$  es cerrado en vista de que  $B$  es cerrado; por ello, tal conjunto es cerrado, discreto e infinito en  $X$ ; lo que contradice que  $X$  sea compacto y  $T_1$ . Por ello, es necesario que  $B$  sea finito. Concluyéndose de 2.4.4, la existencia de una familia  $\mathcal{A} \in \text{MAD}(\omega)$  de modo que  $Y \cong \Psi(\mathcal{A})$ .

Para finalizar, obsérvese que  $\{x_0\}$  no es abierto en  $X$ , pues de lo contrario no podría ser punto de acumulación de ninguno de sus subespacios. Así,  $Y$  es un subespacio denso de  $X$  y como  $X$  es de Hausdorff, compacto, con  $X \setminus Y = \{x_0\}$ , resulta que  $X$  es la compactación unipuntual de  $Y \cong \Psi(\mathcal{A})$ ; esto es,  $X \cong \mathcal{F}(\mathcal{A})$ . ■

## 3.2. La propiedad de Fréchet

Continuando con los frutos del Lema 3.1.6, se extrae el siguiente Corolario; este relaciona las propiedades de combinatoria de las familias casi ajenas con propiedades de convergencia.

**Lema 3.2.1.** *Si  $\mathcal{A}$  es una familia no compacta, entonces para cada  $X \subseteq \omega$  son equivalentes:*

- i)  $\infty \in \text{sqcl}(X)$ .
- ii)  $\mathcal{A} \upharpoonright X \notin \text{MAD}(X)$ .

**Demarcación.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Si  $\infty \in \text{sqcl}(X)$ , entonces existe  $B \subseteq X \subseteq \omega$  de modo que  $B \rightarrow x$  y de acuerdo al Lema 3.1.6 se tiene garantizado que  $B$  es casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$  (pues  $B \cap \mathcal{A}$  es finito, por ser vacío). Entonces  $B \in [X]^\omega$  es casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A} \upharpoonright X$ ; efectivamente, si  $a \cap X \in \mathcal{A} \upharpoonright X$  es cualquiera, entonces  $B \cap (X \cap a) = X \cap (a \cap B) \subseteq a \cap B = * \emptyset$ . Mostrando que  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  no es maximal en  $X$ .

(ii)  $\rightarrow$  (i) Si  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  no es maximal en  $X$ , existe  $B \subseteq X$  infinito y casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A} \upharpoonright X$ . Nótese que entonces  $B \cap X$  es casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ ; y por lo tanto,  $B \rightarrow \infty$  (por 3.1.6). Por ello  $\infty \in \text{sqcl}(B) \subseteq \text{sqcl}(X)$ .  $\blacksquare$

Del Corolario 1.3.11 se desprende fácilmente la contención:

$$\{X \in [\omega]^\omega \mid \forall A \in \mathcal{A} (A \cap X =^* \emptyset)\} \subseteq \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$$

Resulta que la contención recíproca encapsula la conexión que existe entre la combinatoria de  $\mathcal{A}$  y la propiedad de Fréchet de su compacto de Franklin asociado.

**Corolario 3.2.2.** *Sea  $\mathcal{A}$  una familia casi ajena no compacta. Son equivalentes:*

- i)  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es de Fréchet.
- ii)  $\{X \in [\omega]^\omega \mid \forall A \in \mathcal{A} (A \cap X =^* \emptyset)\} = \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ .
- iii)  $\mathcal{A}$  es maximal en ninguna parte.

**Demotración.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Supóngase que  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es de Fréchet. Basta probar la contención recíproca de (ii). Y efectivamente, si  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ , entonces  $\infty \in \text{cl}(X)$  debido 3.1.6, pero como  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  es de Fréchet,  $\infty \in \text{sqcl}(X)$ ; siguiéndose del mismo Lema 3.1.6, que  $X$  es casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{A}$ .

(ii)  $\rightarrow$  (iii) Supóngase (ii) y sea  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  cualquiera. Dada la hipótesis,  $X$  es casi ajeno con cada elemento en  $\mathcal{A}$ , así que por 3.1.6,  $\infty \in \text{sqcl}(X)$ . Obteniéndose del Lema 3.2.1, que  $\mathcal{A} \upharpoonright X \notin \text{MAD}(X)$ .

(iii)  $\rightarrow$  (i) Supóngase que  $\mathcal{A}$  es maximal en ninguna parte. Como  $\Psi(\mathcal{A})$  es de Fréchet (por ser primero numerable) basta verificar la propiedad de Fréchet en  $\infty \in \mathcal{F}(\mathcal{A})$ . Sea  $X \subseteq \mathcal{F}(\mathcal{A})$  de modo que  $\infty \in \text{cl}(X)$ , entonces por 3.1.6,  $X \cap \mathcal{A}$  es infinito o  $X \cap \omega \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$ . Si ocurre lo primero, sea  $B \subseteq X \cap \mathcal{A}$  numerable y nótese que entonces  $B \rightarrow \infty$ , lo cual basta para mostrar que  $\infty \in \text{sqcl}(X)$ . Si ocurre el segundo caso, de la hipótesis se obtiene  $A \upharpoonright (X \cap \omega) \notin \text{MAD}(X \cap \omega)$ , probando que  $\infty \in \text{sqcl}(X \cap \omega) \subseteq \text{sqcl}(X)$  (en virtud 3.2.1). En ambos casos,  $\infty \in \text{sqcl}(X)$ ; y por tanto  $\text{sqcl}(X) = \text{cl}(X)$ .  $\blacksquare$

El Corolario anterior puede ser empleado para solucionar un problema clásico en topología general; determinar si el producto de dos espacios de Fréchet es de Fréchet. Los espacios de Mrówka dejan ver su “maleabilidad” al momento de generar contrajemplos a través de la subsecuente ilación de ideas.

**Proposición 3.2.3.** *Sea  $\mathcal{A}$  una familia casi ajena, unión ajena de las familias no vacías  $\mathcal{B}$  y  $\mathcal{C}$ . Si  $\mathcal{A}$  es maximal en alguna parte, entonces  $\mathcal{F}(\mathcal{B}) \times \mathcal{F}(\mathcal{C})$  no es de Fréchet.*

**Demuestra.** Supóngase que existe  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  de modo que  $\mathcal{A} \upharpoonright X \in \text{MAD}(X)$  y sea  $B := \{(n, n) \mid n \in X\}$ .

Como  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  y  $\mathcal{B}, \mathcal{C} \subseteq \mathcal{A}$ , resulta que  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{B})$  y  $X \in \mathcal{I}^+(\mathcal{C})$  (véase 1.3.8). Entonces se tiene que  $\infty_{\mathcal{B}} \in \text{cl}_{\mathcal{F}(\mathcal{B})}$  y  $\infty_{\mathcal{C}} \in \text{cl}_{\mathcal{F}(\mathcal{C})}$  a consecuencia del Lema 3.1.6. De este modo:

$$(\infty_{\mathcal{B}}, \infty_{\mathcal{C}}) \in \text{cl}_{\mathcal{F}(\mathcal{B}) \times \mathcal{F}(\mathcal{C})}(B)$$

sin embargo  $(\infty_{\mathcal{B}}, \infty_{\mathcal{C}}) \notin \text{sqcl}_{\mathcal{F}(\mathcal{B}) \times \mathcal{F}(\mathcal{C})}(B)$ . Efectivamente, de lo contrario, existe  $Y \in [X]^\omega$  de manera que  $\{(n, n) \mid n \in Y\}$  converge a  $(\infty_{\mathcal{B}}, \infty_{\mathcal{C}})$ . De lo anterior, y la continuidad de las funciones proyección, se obtiene que  $Y \rightarrow \infty_{\mathcal{B}}$  en  $\mathcal{F}(\mathcal{B})$  y  $Y \rightarrow \infty_{\mathcal{C}}$  en  $\mathcal{F}(\mathcal{C})$ . Sin embargo a consecuencia de ello; y por 3.1.6,  $Y \subseteq X$  es infinito y casi ajeno con cada elemento de  $\mathcal{B}$  y  $\mathcal{C}$ ; es decir, con cada elemento de  $\mathcal{AB} \cup \mathcal{C}$ , siendo esto una contradicción a la maximalidad de  $\mathcal{A} \upharpoonright X$  en  $X$ .

Por lo tanto  $(\infty_{\mathcal{B}}, \infty_{\mathcal{C}}) \notin \text{sqcl}_{\mathcal{F}(\mathcal{B}) \times \mathcal{F}(\mathcal{C})}(B)$  y el producto  $\mathcal{F}(\mathcal{B}) \times \mathcal{F}(\mathcal{C})$  no tiene la propiedad de Fréchet. ■

Combinando con el Teorema de Simon (1.4.3), se tiene la siguiente fuente de contrajemplos: Cada vez que  $\mathcal{A}$  sea una familia infinita y maximal (por ello, no compacta), se pueden dar dos familias  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{C}$  no vacías, maximales en ninguna parte, de modo que  $\mathcal{A} = \mathcal{B} \cup \mathcal{C}$ . Y se desprende de la Proposición previa que  $\mathcal{F}(\mathcal{B}) \times \mathcal{F}(\mathcal{C})$  no es de Fréchet; pues claramente  $\mathcal{A}$  es maximal en alguna parte, ya que  $\omega \in \mathcal{I}^+(\mathcal{A})$  (por 1.3.5); y además,  $\mathcal{F}(\mathcal{B})$  y  $\mathcal{F}(\mathcal{C})$  son ambos de Fréchet (por 3.2.2). Esto implica:

**Corolario 3.2.4.** *Existen dos espacios de Mrówka cuyas compactaciones unipuntuales son de Fréchet, pero su producto no*

*En particular, la propiedad de Fréchet no es finitamente productiva; ni siquiera en la clase de espacios compactos, de Hausdorff.*

Dado el Teorema de Simon (1.4.3), toda familia maximal de tamaño  $\kappa$  contiene una familia maximal en ninguna parte de cardinalidad, también  $\kappa$ . De la caracterización dada en 3.2.2 y la Proposición 3.1.4, se obtiene:

**Corolario 3.2.5.** *Si existe una familia maximal de tamaño  $\kappa$ , existe un espacio de Fréchet tal que uno de sus puntos tiene carácter  $\kappa$ .*

*Particularmente, existe un espacio de Fréchet, que contiene un punto de carácter c.*

# 4 Normalidad en los espacios de Mrówka

*La hoy conocida como «Conjetura de Moore» (MC), establece que todo espacio de Moore normal es metrizable; se trata de un problema lanzado a la comunidad matemática por Jones en 1933 que atiende a la cuestión ¿qué requiere un espacio de Moore para ser metrizable?. Este problema marcó un antes y un después para la topología general, consolidándose como uno de los problemas (sino el que más) importantes en la topología y la teoría de conjuntos. MC tiene, presumiblemente, una solución independiente a la axiomática ZFC ([11, p. 429-435]).*

*En el año 1937 (véase [5, Teo 5, p. 676]), el propio Jones muestra la consistencia de la «Conjetura Débil de Moore» (WMC); esto es, cualquier espacio separable, normal y de Moore, debe ser metrizable. Pero no sería sino hasta 1969 cuando Tall, en su tesis doctoral [14], logra establecer una equivalencia para WMC en términos de la existencia ciertos espacios topológicos (Q-sets, Definición 4.1.8) no numerables; mismos para los cuales, Silver mostró consistente su existencia.*

*La meta de este capítulo será exponer las contribuciones de Jones, Silver y Tall; las cuales conjuntamente, permiten mostrar la independencia de WMC de la axiomática usual de ZFC.*

## 4.1. Independencia de la Conjetura Débil de Moore

Por otra parte, todo espacio de Mrówka es de Moore y separable (Corolario 2.1.11); así que el enunciado WMC (por consiguiente, MC) implica que ningún espacio  $\Psi(\mathcal{A})$ ; con  $\mathcal{A}$  una familia casi ajena más que numerable, puede ser normal. Lo que atañía a la presente sección; y claramente presenta una dificultad mayor, es

mostrar el recíproco de la anterior implicación.

Se comenzará exponiendo una condición necesaria que dicta "dónde buscar" espacios de Mrówka que sirvan de contrajemplo para WMC.

**Proposición 4.1.1.** *Sea  $\mathcal{A} \in AD(\omega)$ , se cumple:*

- i) *Si  $|\mathcal{A}| \leq \aleph_0$ , entonces  $\Psi(\mathcal{A})$  es normal.*
- ii) *Si  $\mathcal{A}$  es infinita y  $\Psi(\mathcal{A})$  es normal,  $\mathcal{A}$  no es maximal y además  $\aleph_1 \leq |\mathcal{A}| < c$ .*

**Demostración.** (i) Cualquier espacio de Mrówka numerable es metrizable (por 2.3.1), particularmente normal (**Ree BSB**).

(ii) Supóngase que  $\mathcal{A}$  es infinita y que  $\Psi(\mathcal{A})$  es normal. Si  $\mathcal{A}$  fuera maximal, entonces por 2.3.4 y 2.2.3, se tiene que  $\Psi(\mathcal{A})$  es pseudocompacto pero no numerablemente compacto. Lo cual (por el **RAKA**) imposibilita que  $\Psi(\mathcal{A})$  sea normal. Por tanto,  $\mathcal{A}$  no es maximal. Esto también implica que  $\aleph_1 \leq |\mathcal{A}|$  (en virtud de la Lema 1.1.11).

Finalmente,  $|\mathcal{A}| = c$ , debido a 2.1.7,  $\mathcal{A}$  es un subespacio cerrado y discreto de  $\Psi(\mathcal{A})$  de tamaño  $c$ . Así, de la separabilidad y normalidad de  $\Psi(\mathcal{A})$  se desprende; por el Lema de Jones (léase **TAL**), que  $2^c = 2^{|\mathcal{A}|} \leq 2^{\aleph_0} = c$ , lo cual es imposible. Por lo tanto  $|\mathcal{A}| < c$ . ■

**Corolario 4.1.2.** *Bajo CH; ningún espacio de Mrówka más que numerable, es normal.*

Lo subsecuente caracteriza; en términos simples, la normalidad de un espacio de Mróka, a través de la combinatoria de su familia asociada.

**Proposición 4.1.3.** *Sean  $\mathcal{A}$  una familia casi ajena y  $F, G \subseteq \Psi(\omega)$  cerrados ajenos. Son equivalentes:*

- i)  *$F$  y  $G$  se separan por abiertos ajenos de  $\Psi(\mathcal{A})$ .*

ii)  $F \cap \mathcal{A}$  y  $G \cap \mathcal{A}$  se separan por abiertos ajenos de  $\Psi(\mathcal{A})$ .

iii) La grieta  $(F \cap \mathcal{A}, G \cap \mathcal{A})$  está separada.

**Democión.** La implicación (i)  $\rightarrow$  (ii) es inmediata.

(ii)  $\rightarrow$  (iii) Supóngase que  $U, V \subseteq \Psi(\mathcal{A})$  son abiertos ajenos tales que  $F \cap \mathcal{A} \subseteq U$  y  $G \cap \mathcal{A} \subseteq V$ .

Si  $a \in F \cap \mathcal{A}$  es cualquiera, entonces  $a \in U$  y por definición de la topología en  $\Psi(\mathcal{A})$  resulta que  $a \subseteq^* U$ . Ahora, si  $b \in G \cap \mathcal{A}$  es cualquiera, entonces  $b \subseteq^* V \subseteq \omega \setminus U$ ; de donde,  $b \cap U =^* \emptyset$ . Por lo tanto,  $U$  es separador de  $F \cap \mathcal{A}$  y  $G \cap \mathcal{A}$ .

(iii)  $\rightarrow$  (i) Supóngase que  $D \subseteq \omega$  es separador de  $F \cap \mathcal{A}$  y  $G \cap \mathcal{A}$ . Nótese que  $F \subseteq U := F \cup D \setminus G$ ; y además,  $U$  es abierto. Efectivamente, dado  $a \in U \cap \mathcal{A} \subseteq F \cap \mathcal{A}$  se tiene que  $a \subseteq^* D$  (por ser  $D$  separador de  $F \cap \mathcal{A}$  y  $G \cap \mathcal{A}$ ) y  $a \subseteq^* \Psi(\mathcal{A}) \setminus G$  (por ser  $G$  cerrado y ajeno a  $F$ ), en consecuencia  $a \subseteq^* D \setminus G \subseteq U$ .

Como  $D$  es separador de  $F \cap \mathcal{A}$  y  $G \cap \mathcal{A}$ ;  $\omega \setminus D$  es separador de  $G \cap \mathcal{A}$  y  $F \cap \mathcal{A}$ , y resulta análogo que  $G \subseteq V := G \cup (\omega \setminus D) \setminus F$  y  $V$  es abierto. Probando que  $F$  y  $G$  se separan por los abiertos ajenos  $U$  y  $V$ .  $\blacksquare$

Debido al [Lema 2.1.7](#) y la [Proposición 1.4.6](#), se desprende:

**Corolario 4.1.4.** *Para cada familia casi ajena  $\mathcal{A}$  son equivalentes:*

i)  $\Psi(\mathcal{A})$  es normal.

ii) Para cada  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{A}$ , la grieta  $(\mathcal{B}, \mathcal{A} \setminus \mathcal{B})$  está separada.

La traducción de la [Proposición 4.1.1](#) en términos combinatorios es la siguiente proposición (lo cual, por cierto, demuestra el [Ejemplo 1.4.8](#) de la [Subsección 1.4.2](#)):

**Corolario 4.1.5.** *Sea  $\mathcal{C} \in \text{AD}(\omega)$ , entonces:*

i) Si  $|\mathcal{C}| \leq \aleph_0$ , toda grieta contenida en  $\mathcal{C}$  está separada.

- ii) Si  $\mathcal{C}$  es infinita y,  $|\mathcal{C}| = \mathfrak{c}$  o  $\mathcal{C} \in \text{MAD}(\omega)$ ; entonces  $\mathcal{C}$  contiene una grieta que no está separada.

En términos topológicos, todo espacio  $\Psi(\mathcal{A})$  no normal (con  $\mathcal{A}$  infinita) contiene dos cerrados ajenos que no se pueden separar por abiertos ajenos, y en virtud del punto (i) del anterior corolario, alguno de ellos debe ser no numerable. Surge la siguiente cuestión: ¿cuándo ningún par de cerrados ajenos no numerables se pueden separar?

El análisis expuesto en Subsección 1.4.2 establece que estos espacios son, exactamente, aquellos generados por una familia inseparable (en el sentido de lo comentado en la Página 19), particularmente:

**Corolario 4.1.6.** *Si  $\mathcal{A}$  es una familia que contiene una  $n$ -grieta de Luzin, ningún par de cerrados ajenos no numerables de  $\Psi(\mathcal{A})$  se pueden separar por abiertos ajenos.*

Particularmente,  $\Psi(\mathcal{A})$  tiene tamaño  $\aleph_1$  y no es normal.

Ahora, en virtud del Corolario 1.4.15 se obtiene la siguiente implicación. El recíproco de la misma es claramente meritorio de un estudio más profundo, pues entre más cosas, logra caracterizar por completo la normalidad de los espacios de Mrówka; en ZFC + MA +  $\neg$  CH.

**Corolario 4.1.7.** *Si  $\mathcal{A}$  es una familia casi ajena tal que  $\Psi(\mathcal{A})$  es normal, entonces  $\mathcal{A}$  no contiene  $n$ -grietas de Luzin.*

#### 4.1.1. Consistencia de WMC

Siguiendo la técnica de Tall, para probar la independencia de la Conjetura Débil de Moore (de ZFC), se utilizarán a modo de intermediario los espacios metrizables conocidos como  $Q$ -sets.

**Definición 4.1.8.** Un Q-set es un espacio metrizable, separable y tal que todos sus subespacios son de tipo  $G_\delta$  (equivalentemente;  $F_\sigma$ ).

**Ejemplo 4.1.9.** Cualquier espacio  $X$  a lo más numerable y metrizable es un Q-set. Efectivamente, nótese que  $X$  es separable. Y además, si  $A \subseteq X$  es cualquiera, entonces  $A = \bigcup \{\{a\} \mid a \in X\}$  es de tipo  $F_\sigma$ .

Se comenzará por observar que todo Q-set es; salvo homeomorfismos, un subespacio de  $\mathbb{R}$  (o del conjunto de cantor,  $2^\omega$ ). El siguiente lema, incluido en [9, Teo. 1, p. 286] por Kuratowski; se enunciará y demostrará con terminología moderna.

**Lema 4.1.10.** Sea  $X$  un espacio metrizable por la métrica  $d$ . Si  $|X| < \mathfrak{c}$ , entonces  $X$  es cero-dimensional.

**Demarcación.** Supóngase que  $|X| < \mathfrak{c}$ . Basta corroborar que cada  $x \in X$  admite una base local de abiertos y cerrados. Sean  $x \in X$  y  $\varepsilon > 0$ .

Supóngase ahora que para cada  $\delta \in (0, \varepsilon)$ , el conjunto  $\text{fr}(B(x, \delta))$  es no vacío, y fíjese (AC) un elemento  $x_\delta \in \text{fr}(B(x, \delta)) \subseteq X$ . Como  $|(0, \varepsilon)| = \mathfrak{c}$ , la asignación  $\delta \rightarrow x_\delta$  no puede ser inyectiva. Consecuentemente, existen distintos  $\delta, \delta' \in (0, \varepsilon)$  de modo que  $\text{fr}(B(x, \delta)) \cap \text{fr}(B(x, \delta')) \neq \emptyset$ . Pero esto es imposible, dado que  $\delta \neq \delta'$ .

Por lo tanto, para cada  $\varepsilon > 0$  se puede fijar (AC) cierto  $\delta_\varepsilon \in (0, \varepsilon)$  tal que  $\text{fr}(B(x, \delta_\varepsilon)) = \emptyset$ ; esto es,  $B(x, \delta_\varepsilon)$  es abierto y cerrado a la vez. Claramente  $\{B(x, \delta_\varepsilon) \mid \varepsilon > 0\}$  es una base local para  $x$  en  $X$ . ■

**Proposición 4.1.11.** Para todo espacio  $X$  son equivalentes:

- i)  $X$  es un Q-set.

ii)  $X$  se encaja en  $2^\omega$  y todos sus subespacios son de tipo  $G_\delta$ .

iii)  $X$  se encaja en  $\mathbb{R}$  y todos sus subespacios son de tipo  $G_\delta$ .

**Demostración.** Dada la universalidad del conjunto de Cantor,  $2^\omega \subseteq \mathbb{R}$ , sobre la clase de espacios cero-dimensionales; y que todo subespacio de  $\mathbb{R}$  es metrizable y separable, basta probar que todo  $Q$ -set es cero-dimensional.

Supóngase que  $X$  es un  $Q$ -set, como  $X$  es metrizable y separable, entonces es  $2\text{-AN}$ . Sea  $\mathcal{B}$  una base a lo más numerable  $\mathcal{B}$  para  $X$ .

Como  $X$  es  $Q$ -set, para cada  $A \subseteq X$  fíjese (AC) una colección a lo más numerable de abiertos  $\mathcal{U}$  de modo que  $A = \bigcap \mathcal{U}$ . Y como  $\mathcal{B}$  es base; de nuevo haciendo uso de AC, para cada abierto  $U$  fíjese  $\mathcal{B}_U \subseteq \mathcal{B}$  de modo que  $U = \bigcup \mathcal{B}_U$ .

Lo anterior permite definir  $\mathcal{P}(X) \rightarrow [\mathcal{P}(\mathcal{B})]^{\leq\omega}$  por medio de la correspondencia:  $A \mapsto \{B_U \mid U \in \mathcal{U}\}$ . Nótese que tal asignación es inyectiva, pues si  $\{B_U \mid U \in \mathcal{A}\} = \{B_U \mid U \in \mathcal{B}\}$ , entonces:

$$\mathcal{U}_A = \{\bigcap \mathcal{B}_U \mid U \in \mathcal{U}_A\} = \{\bigcap \mathcal{B}_U \mid U \in \mathcal{U}_B\} = \mathcal{U}_B$$

y con ello  $A = \bigcap \mathcal{U}_A = \bigcap \mathcal{U}_B = B$ . De esta manera:

$$2^{|X|} \leq |[\mathcal{P}(\mathcal{B})]^{\leq\omega}| \leq (2^{|B|})^{\aleph_0} \leq (2^{\aleph_0})^{\aleph_0} = 2^{\aleph_0 \cdot \aleph_0} = 2^{\aleph_0} = \mathfrak{c}$$

La última desigualdad implica que  $|X| < \mathfrak{c}$ . Siguiéndose del Lema previo, la cero-dimensionalidad de  $X$ . ■

**Observación 4.1.12.** *Todo  $Q$ -set tiene tamaño menor que  $\mathfrak{c}$ . Consecuentemente, bajo CH; no existen  $Q$ -sets más que numerables.*

El paralelismo del resultado anterior con el [Corolario 4.1.2](#) no es coincidencia. La meta ahora es mostrar que la existencia de  $Q$ -sets no numerables es equivalente a la existencia de espacios de Mrówka no numerables y normales; más aún, si estos espacios no existen, entonces WMC se satisface.

**Lema 4.1.13.** *Supóngase que  $X$  es normal, de Moore, no metrizable y que  $D \subseteq X$  es denso a lo más numerable; entonces existe  $A \subseteq X \setminus D$  más que numerable, discreto y cerrado en  $X$ .*

**Demuestra**ción. El Teorema de Bing (**BINGEE**) caracteriza la metrización de los espacios de Moore a través de la normalidad colectiva. Por ello,  $X$  no es colectivamente normal y existe una familia discreta  $\mathcal{A}$  de cerrados de  $X$ , cuyos elementos no se pueden separar por abiertos ajenos.

Como  $X$  es normal, para cada par de cerrados ajenos de  $X$ ; digamos  $F$  y  $G$ , elíjanse (AC) abiertos ajenos  $W(F, G), S(F, G)$  de modo que  $F \subseteq W(F, G)$  y  $G \subseteq S(F, G)$ . Es claro que  $\mathcal{A}$  no puede ser finito.

*Afirmación.*  $\mathcal{A}$  es más que numerable.

*Demuestra*ción. Supóngase que  $\mathcal{A}$  está enumerado inyectivamente como  $\{A_n \mid n \in \omega\}$ . Por ser  $\mathcal{A}$  familia discreta de cerrados, si  $n \in \omega$ , entonces  $B_n := \bigcup \{A_m \mid m > n\}$  es cerrado.

Por recursión, sean  $U_0 := W(A_0, B_0)$  y  $V_0 := S(A_0, B_0)$ ; y, para  $n \in \omega$ ,  $U_{n+1} := W(A_{n+1}, B_{n+1}) \cap V_n$  y  $V_{n+1} = S(A_{n+1}, B_{n+1}) \cap V_n$ .

Por construcción,  $\{U_n \mid n \in \omega\}$  es una familia de abiertos, ajenos por pares tales que para cada  $n \in \omega$  se tiene  $A_n \subseteq U_n$ . Así, los elementos de  $\mathcal{A}$  se separan por abiertos ajenos; contradiciendo su elección.  $\square$

Dada la afirmación anterior, y fijando para cada  $a \in \mathcal{A}$  un elemento  $x_a \in A_a$ , se obtiene un conjunto más que numerable  $B := \{x_a \mid a \in \mathcal{A}\}$ ; mismo que por ser  $\mathcal{A}$  familia discreta y  $X$  de Hausdorff, resulta ser cerrado y discreto.

Por último nótese que cada subespacio de  $B$  es discreto y cerrado en  $X$ ; pues  $B$  es discreto y cerrado en  $X$ . Particularmente,  $A := B \setminus D$  es discreto, discreto en  $X$  y no numerable (pues  $B$  es más que numerable y  $D$  es numerable).  $\blacksquare$

El siguiente teorema aparece en la tesis doctoral de Franklin David Tall (ver [14]), y es la pieza clave para atacar la Conjetura Débil de Moore.

**Teorema 4.1.14 (Tall)**

Si  $\kappa$  es un cardinal infinito, son equivalentes:

- i) Existe un espacio de Moore, normal, no metrizable de tamaño  $\kappa$ .
- ii) Existe un espacio de Mrówka normal de tamaño  $\kappa$ .
- iii) Existe un  $Q$ -set de tamaño  $\kappa$ .

**Demostración.** (i)  $\rightarrow$  (ii) Supóngase que  $X$  es un espacio, normal, de Moore y no metrizable de tamaño  $\kappa$  y sea fíjese  $D \subseteq X$  denso numerable de  $X$ . Por 4.1.13,  $D$  es infinito y existe un subespacio  $A \subseteq X \setminus D$  más que numerable; discreto y cerrado de  $X$ . Como  $X$  es de Hausdorff y primero numerable, considérese  $\mathcal{A}_{D,A} = \{A_x \in [D]^\omega \mid x \in A\}$ ; la familia de sucesiones en  $D$  convergentes a  $A$  (definida en 1.2.2), donde cada  $A_x$  converge a  $x$ . Por la Proposición 1.2.1,  $|\mathcal{A}_{D,A}| = \kappa$  y así mismo,  $\Psi_D(\mathcal{A}_{D,A}) = \kappa$ .

Sea  $\mathcal{B} := \{A_x \mid x \in F\} \subseteq \mathcal{A}_{D,A}$  cualquiera. Como  $A$  es discreto y cerrado en  $X$ , cualquiera de sus subespacios es cerrado en  $X$ ; en consecuencia y por normalidad de  $X$ , existen abiertos  $U, V \subseteq X$  ajenos, de modo que  $F \subseteq U$  y  $A \setminus F \subseteq V$ . Si  $x \in F$ , entonces  $A_x \rightarrow x$  y por ello  $A_x \subseteq^* U$ , similarmente, si  $y \in A \setminus F$ , entonces  $A_y \subseteq^* V \subseteq X \setminus U$ ; de donde  $A_y \cap U^* = \emptyset$ .

Por tanto  $(\mathcal{B}, \mathcal{A}_{D,A} \setminus \mathcal{B})$  está separada, obteniéndose de 4.1.4 la normalidad de  $\Psi_D(\mathcal{A}_{D,A})$ .

(ii)  $\rightarrow$  (iii) Si  $\kappa = \omega$ , la implicación resulta vacua; pues todo subespacio numerable de  $2^\omega$  es un  $Q$ -set (Ejemplo 4.1.9). Supóngase pues, que  $\Psi(\mathcal{A})$  es un espacio normal de tamaño  $\kappa > \omega$ ; siendo necesario que  $|\mathcal{A}| = \kappa$ .

Para cada  $C \subseteq \omega$  denótese por  $\varphi_C \in 2^\omega$  a la función característica de  $C$  y sea  $X := \{\varphi_A \in 2^\omega \mid A \in \mathcal{A}\}$ . Obsérvese que  $X$  es un espacio metrizable, separable (por ser subespacio del metrizable, separable,  $2^\omega$ ) de tamaño  $\kappa$ .

Sea  $Y = \{\varphi_A \in X \mid A \in \mathcal{B}\} \subseteq X$  cualquiera. Dado el Corolario 4.1.4, la normalidad de  $\Psi(\mathcal{A})$  implica la existencia de un separador de  $\mathcal{A} \setminus \mathcal{B}$  y  $\mathcal{B}$ ; de este

modo:

$$\begin{aligned}
 Y &= \{\varphi_A \in X \mid A \in \mathcal{B}\} \\
 &= \{\varphi_A \in X \mid A \cap D \neq^* \emptyset\} \\
 &= \{\varphi_A \in X \mid \forall n \in \omega (A \cap D \not\subseteq n)\} \\
 &= \bigcap_{n \in \omega} \{\varphi_A \in X \mid A \cap D \not\subseteq n\}
 \end{aligned}$$

Ahora, si  $n \in \omega$  y  $\varphi \in U_n := \{\varphi_A \in X \mid A \cap D \not\subseteq n\}$  es cualquiera, existe cierto  $k \in (A \cap D) \setminus n$ . Por ello, si  $x = \varphi_B \in X$  es tal que  $x(k) = 1$ , entonces  $k \in (B \cap D) \setminus n$  y  $B \cap D \not\subseteq n$ ; es decir  $f \in U_n$ . Mostrando así que  $\{x \in X \mid x \upharpoonright \{k\} = \varphi \upharpoonright \{k\}\} \subseteq U_n$ . Por lo tanto, cada  $U_n$  es abierto en  $X$ . De esta manera, cualquier  $Y \subseteq X$  es  $G_\delta$  en  $X$  y  $X$  es un  $Q$ -set.

(iii)  $\rightarrow$  (i) Supóngase que  $X$  es un  $Q$ -set de tamaño  $\kappa$ . En virtud del [Proposición 4.1.11](#), supóngase sin pérdida de generalidad que  $X \subseteq 2^\omega$ . Para cada  $E \subseteq X$  considérese  $\mathcal{A}_E := \{A_x \in [N]^\omega \mid x \in E\}$ , la familia de las ramas de  $E$  en  $N$  ([definida en 1.2.5](#)); donde  $N := 2^{<\omega}$  y cada  $A_x$  es el conjunto  $\{x \upharpoonright n \mid n \in \omega\} \subseteq N$ . Puesto que  $|X| = \kappa$ , del [Definición 1.2.5](#) se sigue que  $|\mathcal{A}_X| = \kappa$ , y con ello  $|\Psi_N(\mathcal{A}_X)| = \kappa$ .

Sea  $Y \subseteq X$  cualquiera. Como  $X$  es un  $Q$ -set,  $Y = \bigcup \{F_n \mid n \in \omega\}$  y  $X \setminus Y = \bigcup \{G_n \mid n \in \omega\}$ ; donde cada conjunto  $F_n$  y  $G_n$  es cerrado en  $X \subseteq 2^\omega$ . Para cada  $n \in \omega$  defínanse los conjuntos:

$$\begin{aligned}
 D_n &:= (\bigcup \mathcal{A}_{F_n}) \setminus \bigcup_{m < n} (\bigcup \mathcal{A}_{G_m}) \\
 L_n &:= (\bigcup \mathcal{A}_{G_n}) \setminus \bigcup_{m \leq n} (\bigcup \mathcal{A}_{F_m})
 \end{aligned}$$

y sea  $D := \bigcup \{D_n \mid n \in \omega\}$ . Nótese que por construcción, si  $m, n \in \omega$ , se tiene  $D_n \cap L_m = \emptyset$ ; consecuentemente, cada  $L_n$  es ajeno con  $D$ .

Sea  $y \in A_Y$ ; entonces existe  $n \in \omega$  de modo que  $y \in F_n$ . Por otra parte, cada  $G_m \subseteq X \setminus Y$  (con  $m < n$ ) es cerrado en  $X$ , por lo que existe  $s \in \omega$  de modo que:

$$\{x \in X \mid x \upharpoonright s = y \upharpoonright s\} \subseteq X \setminus \bigcup_{m < n} G_m$$

Por ello, si  $v \in A_y \setminus D_n \subseteq F_n$ , existen  $x \in F_n$  y  $k \in \omega$  de modo que  $v = x \upharpoonright k$ . Así que  $x \in \bigcup \mathcal{A}_{F_n}$ ; y como  $v \notin D_n$ , existen  $m < n$  y  $g \in G_m$  de manera que  $v = y \upharpoonright k = g \upharpoonright k$ . Y a razón de ello, no puede ocurrir  $s \subseteq k$ . Por lo tanto  $k < s$  y  $A_y \setminus D_n \subseteq 2^{<s} =^* \emptyset$ ; esto es,  $A_y \subseteq^* D_n \subseteq D$ .

Similarmente, para cada  $y \in X \setminus Y$  existe un  $n \in \omega$  tal que  $A_y \subseteq^* L_n \subseteq N \setminus D$ ; de donde,  $A_y \cap D = \emptyset$ . Así que  $D$  es separador de  $\mathcal{B}$  y  $\mathcal{A} \setminus \mathcal{B}$ ; probando por el [Corolario 4.1.4](#) la normalidad de  $\Psi_N(\mathcal{A}_X)$ . ■

Es inmediato al [Teorema 4.1.14](#) (y a [4.1.2](#), o bien, [4.1.12](#)) la siguiente consecuencia:

**Corolario 4.1.15.** *Bajo CH; se cumple WMC, y:*

- i) *Ningún espacio de Mrówka no numerable es normal.*
- ii) *Ningún Q-set es más que numerable.*

Consecuentemente WMC es consistente con ZFC.

#### 4.1.2. Consistencia de $\neg$ WMC

Para la segunda parte de la prueba de independencia de WMC se hará uso; como es previsible desde anteriores capítulos, de la negación de CH con el Axioma de Martin. Se comenzará observando cómo se pueden caracterizar a todos los Q-sets haciendo uso del Lema de Solovay y MA.

**Lema 4.1.16.** *Sea  $X$  un espacio metrizable y separable. Entonces existe una base  $\mathcal{B} = \{B_n \mid n \in \omega\}$  para  $X$  de modo que  $\{A_x \mid x \in X\}$  es familia casi ajena; donde, cada  $A_x$  es  $\{n \in \omega \mid x \in B_n\}$ .*

**Demostración.** Por el teorema (**Arhangelskii**),  $X$  admite una base regular (véase **BsRg**)  $\mathcal{C}$ . Como  $X$  es 2 AN (a consecuencia de ser metrizable y separable **VeR**), existe una base  $\mathcal{B} = \{B_n \mid n \in \omega\} \subseteq \mathcal{C}$ , claramente  $\mathcal{B}$  sigue siendo regular.

Dados  $x, y \in X$  son distintos, sean  $U, V$  abiertos ajenos que separan a  $x$  y  $y$ . Por regularidad de la base  $\mathcal{B}$ , existe  $W \subseteq U$  abierto con  $x \in W$  y  $\mathcal{B}_W := \{n \in \omega \mid x \in B_n\}$ .

$\omega \mid B_n \cap W \neq \emptyset \wedge B_n \setminus W \neq \emptyset \} =^* \emptyset$ . Por consiguiente, el conjunto  $A_x \cap A_y \subseteq \mathcal{B}_W$  es finito.  $\blacksquare$

**Proposición 4.1.17** (Tall, Silver). *Sea  $X$  espacio topológico. Bajo MA;  $X$  es un  $Q$ -set si y sólo si es homeomorfo a un subespacio  $X \in [\mathbb{R}]^{<\mathfrak{c}}$ .*

**Demarcación.** Supóngase MA. La suficiencia viene dada por 4.1.14 y 4.1.11. Para la necesidad supóngase que  $X \in [\mathbb{R}]^{<\mathfrak{c}}$ , si  $X$  es a lo más numerable, de 4.1.14 y 4.1.1 se sigue que  $X$  es un  $Q$ -set.

Como  $X$  es metrizable y separable, sean  $\mathcal{B}, B_x$  (para cada  $x \in X$ ) y  $\mathcal{A}$  como en el Lema previo. Tómense  $Y \subseteq X$  cualquiera y  $B := \{B_y \in \mathcal{A} \mid y \in Y\}$ .

Como  $|\mathcal{A} \setminus \mathcal{B}|, |\mathcal{B}| < \mathfrak{c}$  y se cumple MA, del Lema 1.4.21 se desprende la existencia de cierto  $D \subseteq \omega$  de modo que para cada  $y \in Y$  y  $x \in X \setminus Y$  se tiene  $A_y \cap D \neq^* \emptyset$  y  $A_x \cap D =^* \emptyset$ .

Para cada  $n \in \omega$  sea  $U_n := \bigcup \{B_m \in \mathcal{B} \mid m \in D \setminus n\}$ , se afirma que  $Y = \bigcap \{U_n \mid n \in \omega\}$ . Efectivamente; si  $y \in X \setminus Y$  y  $n \in \omega$  son cualesquiera,  $A_y \cap D$  es infinito, y por ello, existe  $m \in D \setminus n$  tal que  $y \in B_m$ . En consecuencia  $y \in U_n$ , y así  $Y \subseteq \bigcap \{U_n \mid n \in \omega\}$ .

De manera similar, si  $x \in X \setminus Y$ ,  $A_x \cap D$  es finito y existe  $n \in \omega$  de modo que  $A_x \cap D \subseteq n$ . Por lo que para cada  $m > n$  se tiene que  $x \notin B_m$ ; luego entonces,  $x \notin U_n$ . Lo anterior muestra que  $X \setminus Y \subseteq X \setminus \bigcap \{U_n \mid n \in \omega\}$ .

Por lo tanto  $Y = \bigcap \{U_n \mid n \in \omega\}$  y es  $G_\delta$ .  $\blacksquare$

Nótese que la influencia de MA en la previa caracterización radica únicamente en la necesidad, cuando  $\aleph_1 \leq |X| < \mathfrak{c}$ .

De la proposición recién mostrada, el Teorema 4.1.14 y el Corolario 4.1.15 surge el resultado que pone punto final a la Conjetura Débil de Moore (y prueba la consistencia de la negación de la Conjetura de Moore).

**Corolario 4.1.18.** *Bajo MA; para cada cardinal infinito  $\kappa < \mathfrak{c}$  existe un espacio de Mrówka normal, de tamaño  $\kappa$ . Consecuentemente:*

- i) *Bajo MA +  $\neg$  CH; existen tales espacios.*

ii)  $\neg \text{WMC}$  (y por ello,  $\neg \text{MC}$ ) es consistente con ZFC.

iii) WMC es independiente de ZFC.

Contrastable con 4.1.17 es el hecho de que aun no se ha dado una caracterización para la normalidad de los espacios de Mrówka. Resulta seductor conjeturar que cualquier espacio de Isbell-Mrówka de tamaño menor al continuo es normal. Sin embargo, el Corolario 4.1.6 muestra que; bajo MA +  $\neg \text{CH}$ , existe un espacio de Mrówka, no normal y de tamaño menor al continuo.

El comentario anterior deja como consecuencia la falsedad de que cualquier familia casi ajena sea *esencialmente igual* a alguna de las definidas en 1.2.5 (en el sentido lo comentado en la Página 40); de lo contrario, cualquier espacio espacio de Isbell-Mrówka de tamaño menor al continuo sería es normal, cosa que es falsa (al menos desde ZFC únicamente).

## 4.2. Equivalencia para la normalidad de $\Psi(\mathcal{A})$ bajo MA

*En esta sección se concluirá el capítulo (y posiblemente la tesis) mostrando un resultado del artículo “n-Luzin Gaps” de Hrusak y Osvaldo Guzman «falta crear la referencia». Específicamente, se mostrará utilizando técnicas básicas de forcing y forcing iterado, que, bajo MA y  $\neg \text{CH}$ , el espacio  $\Psi(\mathcal{A})$  es normal si y sólo si  $|\mathcal{A}| < \mathfrak{c}$  y  $\mathcal{A}$  no contiene n-grietas de Luzin.*

AQUI EMPIEZA EL DOLOOOOR EQUISDE

# Caracterizaciones

$\sigma$ -compacidad de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 38

cero-dimensionalidad de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 34

compacidad de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 36

compacidad de los subespacios de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 35

compacidad local hereditaria de cualquier espacio infinito, separable, de Hausdorff, 42

compacidad local hereditaria y pseudocompacidad de cualquier espacio infinito, separable, de Hausdorff, 43

compacidad numerable de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 36

homeomorfismo con  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$  ( $\mathcal{A}$  maximal), 56

metrizabilidad de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 38

Normalidad de  $\Psi(\mathcal{A})$  (con grietas separables), 63

ordenabilidad lineal de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 40

primero numerabilidad de  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ , 53

propiedad de

Tychonoff en  $\Psi(\mathcal{A})$ , 34

Fréchet en  $\mathcal{F}(\mathcal{A})$ , 58

Hausdorff en  $\Psi(\mathcal{A})$ , 34

Lindelöf en  $\Psi(\mathcal{A})$ , 38

pseudocompacidad de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 39

segundo numerabilidad de  $\Psi(\mathcal{A})$ , 38

separabilidad hereditaria de cualquier espacio infinito, separable, de Hausdorff, hereditariamente localmente compacto, 48



# Índice Simbólico

$D_G$ (si $G \subseteq \mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ ), 25	$\Psi_N(\mathcal{A})$ , 31	$\mathcal{A}_{D,A}$ , 8
$D_a$ (si $a \in \mathcal{A}$ ), 25	$\leq_{\mathcal{A}}$ , 24	$\mathcal{F}(\mathcal{A})$ , 51
$\text{AD}(N)$ , 3	$\mathbb{P}_{\mathcal{A}}$ , 24	$\mathcal{I}(\mathcal{A})$ , 11
$\text{MAD}(N)$ , 4	$\mathcal{B}_{\mathcal{A}}$ , 32	$\mathcal{J}^+(\mathcal{A})$ , 11
$\text{WMC}$ , 61	$\mathcal{B}_x$ , 31	$\mathcal{J}_N(\mathcal{A})$ , 11
$\Phi_h$ , 5	$\mathfrak{a}$ , 10	$\mathcal{J}_N^+(\mathcal{A})$ , 11
$\text{MC}$ , 61	$\mathcal{A} \upharpoonright X$ , 13	$\mathcal{T}_{\mathcal{A}}$ , 31
$\Psi(\mathcal{A})$ , 31	$\mathcal{A}_X$ , 10	$\mathcal{T}_{N,\mathcal{A}}$ , 30



# Índice Alfabético

- Q-set, 65
- $\Psi$ -espacio, 31
- $n$ -grieta
  - de Luzin, 22
- cardinal
  - de casi ajenidad, 10
- casi
  - ajena sobre  $N$ , familia, 3
  - ajena, familia, 3
  - ajenidad, cardinal de, 10
  - ajeno, 3
- compacto
  - de Franklin, 51
- Conjetura
  - de Moore, 61
  - débil de Moore, 61
- Dokálková
  - Lema de, 16
- espacio
  - , $\Psi$ , 31
  - de Isbell-Mrówka, 34
  - de Mrówka, 34
- familia
  - casi ajena, 3
- maximal, 4
- casi ajena sobre  $N$ , 3
  - maximal en  $N$ , 4
- de
  - ramas de  $X$  en  $2^\omega$ , 10
  - sucesiones en  $D$  convergentes a  $A$  en  $X$ , 8
- de Luzin, 20
- débilmente separada, 27
- inseparable, 19
- maximal en alguna parte, 13
- maximal en ninguna parte, 13
- no compacta, 51
- normal, 19
- parcialmente separable, 19
- que contiene a una grieta, 18
- separable, 19
- familias
  - esencialmente iguales, 40
- Franklin
  - compacto de, 51
- grieta, 18
  - contenida en una familia, 18
  - de Luzin, 22
  - separada, 18

hipótesis  
de Jones, 27

ideal generado por  $\mathcal{A}$ , 11

Isbell-Mrówka  
espacio de, 34

topología de, 31

Jones  
hipótesis de, 27

Kannan  
Teorema de Rajagopalan y, 42

Lema  
de Dokálková, 16  
de Solovay, 26

Luzin  
 $n$ -grieta de, 22  
familia de, 20  
grieta de, 22

Moore  
conjetura de, 61  
conjetura débil de, 61

Mrówka  
topología de, 31

espacio de, 34

orden  
basado en  $\mathcal{A}$ , 24

parte  
positiva de  $\mathcal{A}$ , 11

Rajagopalan  
Teorema de Kannan y, 42

separador, 18

Simon  
Teorema de, 17

Solovay  
Lema de, 26

Teorema  
de Kannan y Rajagopalan, 42  
de Simon, 17

testigos  
de una  $n$ -grieta de Luzin, 22

topología  
de Isbell-Mrówka, 31  
de Mrówka, 31

traza de  $\mathcal{A}$  en  $X$ , 13

# Referencias

- [1] Fidel Casarrubias y Angel Tamariz. *Elementos de Topología General*. 1.<sup>a</sup> ed. Aportaciones Matemáticas, 2019.
- [2] Michael Hruák. «Almost disjoint families and topology». En: *Recent Progress in General Topology III*. Springer, 2013, págs. 601-638.
- [3] Michael Hruák y Fernando Hernández. «Topology of Mrówka-Isbell Spaces». En: *Pseudocompact topological spaces, Gainesville*. Springer. 2018, págs. 253-289.
- [4] Thomas Jech y Thomas Jech. *Set theory: The third millennium edition, revised and expanded*. Vol. 3. Springer, 2006.
- [5] F Burton Jones. «Concerning normal and completely normal spaces». En: (1937).
- [6] Varadachariar Kannan y Minakshisundaram Rajagopalan. «Hereditarily locally compact separable spaces». En: *Categorical Topology: Proceedings of the International Conference, Berlin*. Springer. 1979, págs. 185-195.
- [7] Kenneth Kunen. *Set theory an introduction to independence proofs*. Vol. 102. Elsevier, 1980.
- [8] Kenneth Kunen y Jerry Vaughan. *Handbook of set-theoretic topology*. Elsevier, 1984.
- [9] Kazimierz Kuratowski. *Topology: Volume I*. Vol. 1. Elsevier, 1966.
- [10] Georgina Noriko. «Algunas propiedades de los espacios de Mrówka». Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, 2009.
- [11] Peter J Nyikos. «A provisional solution to the normal Moore space problem». En: *Proceedings of the American Mathematical Society* 78.3 (1980).

- [12] Waclaw Sierpinski. «Cardinal and ordinal numbers». En: *Polska Akademia Nauk, Monografie Matematyczne* 34 (1958).
- [13] Petr Simon. «A compact Fréchet space whose square is not Fréchet». En: *Commentationes Mathematicae Universitatis Carolinae* (1980).
- [14] Franklin David Tall. «Set-theoretic consistency results and topological theorems concerning the normal Moore space conjecture and related problems». Tesis Doctoral. The University of Wisconsin-Madison, 1969.