

Notas del teórico

Complementos de análisis matemático - Irene Drelichman 2024

BUSTOS JORDI

Bustos Jordi
jordibustos01@gmail.com

Contenido

7 | Prefacio

9 | Clase I - 23/08

2.1	Repaso de funciones	9
2.1.1	Propiedades	9
2.1.2	Función inversa	10
2.1.3	Composición de funciones	10
2.1.4	Familia de funciones	11
2.2	Números naturales	11
2.3	Cuerpo	12
2.3.1	Axiomas de la suma	12
2.3.2	Axiomas del producto	12
2.3.3	Cuerpos Ordenados	13

15 | Clase II - 27/08

3.1	Cuerpo Arquimediano	15
3.2	Supremo e ínfimo	15
3.3	Cuerpo completo	17
3.4	Cardinalidad - introducción	18

21 | Clase III - 30/08

4.1	Conjuntos numerables	21
4.2	Cantor - Schröder - Bernstein	22
4.3	Los Reales son no numerables	23
4.3.1	Principio de encaje de Intervalos	23
4.4	Propiedades	24

| Clase IV - 03/09

Contenido • 3

5.1	Operaciones con cardinales	27
5.2	Hipótesis del continuo	29
5.3	Construcción de los Reales	30

32 | Clase V - 06/09

6.1	Construcción de los Reales	32
6.2	Cuerpo ordenado	33
6.3	\mathbb{R} tiene la propiedad del supremo	34

38 | Clase VI - 10/09

7.1	Sucesiones	38
7.2	Propiedades de límites	39
7.3	Ejemplo subsucesiones	40
7.4	Punto de acumulación	41

44 | Clase VII - 13/09

8.1	Límite superior e inferior	44
8.2	Sucesiones de Cauchy	44
8.3	Límites infinitos	45
8.4	Series numéricas	46

49 | Clase VIII - 24/09

9.1	Ejemplo de convergencia condicional	49
9.2	Corolarios de series	49
9.3	Criterios de convergencia	50
9.3.1	Criterio de la raíz	50
9.3.2	Criterio del cociente y D'Alembert	50
9.3.3	Criterio de Dirichlet - Abel	52
9.4	Parte positiva y negativa	53
9.5	Reordenamientos	53

56 | Clase IX - 27/09

10.1	(Continuación) Reordenamientos	56
10.2	Topología Euclídea	56
10.2.1	Conjuntos abiertos	57
10.2.2	Interior de un conjunto	58
10.3	Entorno	59
10.4	Conjunto Cerrado	60
10.4.1	Clausura	60

63 | Clase X - 01/10

11.1	(Continuación) Clausura	63
11.2	Punto de acumulación	63
11.3	Sucesiones en varias dimensiones	65
11.4	Conjuntos compactos	67

70 | Clase XI - 04/10

12.1	(Continuación) Conjuntos Compactos	70
12.2	Propiedades de límites	72

76 | Clase XII - 08/10

13.1	Límites en varias dimensiones	76
13.2	Continuidad en un punto	76
13.3	Composición de funciones	76
13.4	Continuidad global	76

78 | Clase XIII - 15/10

14.1	Gráficas continuas	78
14.2	Teorema de Weierstrass	78
14.3	Teorema del valor intermedio	78
14.4	Convexidad	78

80 | Clase XIV - 18/10

15.1	Continuidad uniforme	80
15.2	Conjuntos Conexos y Arco-conexos	80

This page is intentionally left blank.

Prefacio

“Considero a cada hombre como un deudor
de su profesión,
y ya que de ella recibe sustento y provecho,
así debe procurar,
mediante el estudio,
servirle de ayuda y ornato.”

Francis Bacon

Este libro recoge las notas tomadas durante el curso de Complementos de Análisis Matemático dictado por Irene Drelichman en el segundo cuatrimestre de 2024.

Las clases 1 a 8, junto con la primera parte de la clase 9, abarcan la primera mitad del curso. Las clases 9 a 22 cubren la segunda mitad, que incluye temas de diferenciación, integración y ecuaciones diferenciales, los cuales no fueron evaluados en la práctica. Se tomaron dos exámenes parciales, uno por cada mitad del curso.

Las clases 9 a 11 (hasta la mitad) cubren los conceptos básicos de Topología. Desde la segunda mitad de la clase 11 hasta la 14 se aborda la continuidad. Los teoremas de la función inversa e implícita se tratan en las clases 15 y 16. La integración se desarrolla en las clases 17 a 19. Las clases 20 a 22 (hasta la mitad) se dedican a las sucesiones de funciones, y finalmente, se introducen las ecuaciones diferenciales.

Estas notas se basan principalmente en material de los libros *Principles of Mathematical Analysis* de Walter Rudin, *Curso de análise vol.1* de Elon Lages Lima y *Calculus* de Tom M. Apostol.

This page is intentionally left blank.

Clase I - 23/08

2.1 Repaso de funciones

Una función $f : A \rightarrow B$ es un objeto que consta de tres partes: un conjunto A (dominio), un conjunto B (codominio) y una regla que permite asociar todo elemento de A a un único elemento de B . Es decir, $f(x) \in B$, donde $x \in A$. Además, $f(x) = y$, lo que significa que f asigna a x el valor $f(x)$.

El gráfico de $f : A \rightarrow B$ es el subconjunto de $A \times B$ dada por $(x, f(x))$ con $x \in A$ y $f(x) \in B$. Notamos $G(f) = \{(x, y) \in A \times B : y = f(x)\}$.

Definición 2.1. $f : A \rightarrow B$ es inyectiva cuando para $x, y \in A$, $f(x) = f(y) \Rightarrow x = y$.

Definición 2.2. $f : A \rightarrow B$ es suryectiva cuando para $(\forall y \in B)(\exists x \in A)(f(x) = y)$

Definición 2.3. $f : A \rightarrow B$ si es inyectiva y suryectiva.

Definición 2.4. Dados $f : A \rightarrow B$ y $X \subset A$ se llama imagen de X por f al conjunto $f(X) = \{f(x) : x \in X\}$.

2.1.1. Propiedades

Proposición 2.5. $f(X) \cup f(Y) = f(X \cup Y)$

Proposición 2.6. $f(X \cap Y) \subset f(X) \cap f(Y)$. La igualdad vale si y sólo si es inyectiva.

Demostración. Sea $a \in f(X \cap Y) \Rightarrow \exists x \in X \cap Y : f(x) = a \Rightarrow x \in X \Rightarrow f(x) \in f(X)$ y $y \in Y \Rightarrow f(y) \in f(Y)$.

Si $f : A \rightarrow B$ no es inyectiva $\Rightarrow \exists x \neq y : f(x) = f(y)$. Si $X = \{x\}$, $Y = \{y\} \Rightarrow X \cap Y = \emptyset$. $f(X) \cap f(Y) = \{f(x)\}$ luego $f(X \cap Y) = \emptyset$.

Si f es inyectiva, sea $y \in f(X) \cap f(Y) \Rightarrow \exists a \in X, b \in Y$ tal que $f(a) = f(b) = y$. Como f es inyectiva $a = b \Rightarrow a \in X \cap Y \Rightarrow y = f(a), y \in f(X \cap Y) \Rightarrow f(X) \cap f(Y) \subset f(X \cap Y)$
 \therefore Si f es inyectiva son iguales. \square

Proposición 2.7. $X \subset Y \Rightarrow f(X) \subset f(Y)$

Proposición 2.8. $f(\emptyset) = \emptyset$

Definición 2.9. Dados $f : A \rightarrow B$ y $Y \subset B$ se llama preimagen de Y por f al conjunto $f^{-1}(Y) = \{x \in A : f(x) = y, \forall y \in Y\}$.

2.1.2. Función inversa

Sea $f : A \rightarrow B$:

Proposición 2.10. $f^{-1}(X) \cup f^{-1}(Y) = f^{-1}(X \cup Y)$

Proposición 2.11. $f^{-1}(X) \cap f^{-1}(Y) = f^{-1}(X \cap Y)$

Proposición 2.12. $f^{-1}(Y^c) = (f^{-1}(Y))^c$

Proposición 2.13. $Y \subset Z \Rightarrow f^{-1}(Y) \subset f^{-1}(Z)$

Proposición 2.14. $f^{-1}(B) = A$

Proposición 2.15. $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset$

2.1.3. Composición de funciones

Sean $f : A \rightarrow B$ y $g : B \rightarrow C$, definimos $g \circ f : A \rightarrow C$ como $(g \circ f)(x) = g(f(x)) \forall x \in A$, es suficiente que $f(A) \subset B$.

Proposición 2.16. Composición de funciones suryectivas/inyectivas es suryectiva/inyectiva.

Proposición 2.17. $(g \circ f)^{-1}(Z) = f^{-1}(g^{-1}(Z))$.

Definición 2.18. La restricción de f en un subconjunto $X \subset A$ la notamos $f|_X : X \rightarrow B$.

Definición 2.19. Dada $f : A \rightarrow B$ y $g : B \rightarrow A$, g es una inversa a izquierda si y sólo si $g \circ f = \text{id}_A$. $\exists g$ si y sólo si f es inyectiva.

Análogamente para la inversa a derecha si f es suryectiva. Si f es biyectiva $\Rightarrow g$ es inversa a ambos lados y es única.

2.1.4. Familia de funciones

Sea L un conjunto de elementos que llamamos índices y representamos genéricamente con λ .

Dado un conjunto X , una familia de elementos de X con índices en L es $X : L \rightarrow x$. El valor de x en $\lambda \in L$ lo notamos x_λ y la familia $(x_\lambda)_{\lambda \in L}$.

Ejemplo. $L = \{1, 2\}$ los valores de $x : \{1, 2\} \rightarrow X$ se representan por x_1, x_2 , es decir que los puedo identificar con pares ordenados (x_1, x_2) de elementos de X .

Una familia con elementos en \mathbb{N} se llama sucesión. $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de elementos de X es una función de $x : \mathbb{N} \rightarrow X$ donde $x_n = x(n)$.

Las propiedades enunciadas previamente se pueden extender a cualquier familia de conjuntos.

2.2 Números naturales

Partimos de un conjunto \mathbb{N} y una función $S : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ que cumple los siguientes axiomas (de Peano):

- 1) Es inyectiva.
- 2) $\mathbb{N} - S(\mathbb{N})$ tiene un solo elemento y lo llamamos 1.
- 3) Principio de inducción, si $X \subset \mathbb{N}$ tal que $1 \in X$ y $\forall m \in X$ vale $S(m) \Rightarrow X = \mathbb{N}$.

El principio de inducción permite definir operaciones

La suma se define como $m + 1 = S(m)$, $m + S(n) = S(m + n)$.

Proposición 2.20. Asociatividad: sea $X = \{p \in \mathbb{N} : m + (n + p) = (m + n) + p, \forall n, m \in \mathbb{N}\}$.

Demostración. $1 \in X$, $p \in X \Rightarrow m + (n + S(p)) = m + S(n + p) = S(m + (n + p)) = S((n + m) + p) = (m + n) + S(p)$. Por inducción $X = \mathbb{N}$. \square

Proposición 2.21. Conmutatividad: $n + m = m + n$.

Proposición 2.22. Ley de cancelación: $m + n = m + p \Rightarrow n = p$.

Proposición 2.23. Tricotomía: $m, n \in \mathbb{N}$, si $m > n$, $\exists p : m + p = n$. Si $m < n$, $\exists p \in \mathbb{N} : n + p = m$.

Definición 2.24. La multiplicación se define recursivamente como: $m \times 1 = m$ y $m \times (n + 1) = m \times n + m$.

Cumple la asociatividad, conmutatividad, ley de cancelación y monotonía.

Teorema 2.25. Principio de buena ordenación

Todo subconjunto no vacío $A \subset \mathbb{N}$ tiene un elemento mínimo.

Demostración. Llamemos $\mathbb{I}_m = \{p \in \mathbb{N} : 1 \leq p \leq m\} = [[1, m]]$ y $X = \{m \in \mathbb{N} : \mathbb{I}_m \subset \mathbb{N} - A\}$.

Si $1 \in A \Rightarrow 1$ es primer elemento. Si $1 \notin A \Rightarrow 1 \in X$ como $X \neq \mathbb{N}$ pues $X \subseteq \mathbb{N} - A$ y $A \neq \emptyset$. Por el principio de inducción $\exists m \in X$ tal que $m + 1 \notin X$, si no tendríamos que $X = \mathbb{N}$. Luego todos los elementos entre 1 y m están en $\mathbb{N} - A$ y $m + 1 \in A$, se sigue que $a = m + 1$ es primer elemento de A . \square

2.3 Cuerpo

Un cuerpo es un conjunto dotado de dos operaciones, suma y producto y se denota por \mathbb{K} .

2.3.1. Axiomas de la suma

- 1) Asociatividad: $\forall x, y, z \in \mathbb{K}, (x + y) + z = x + (y + z)$.
- 2) Conmutatividad: $\forall x, y \in \mathbb{K}, x + y = y + x$.
- 3) Neutro: $\exists 0 \in \mathbb{K} : x + 0 = x, \forall x \in X$.
- 4) Opuesto: $\forall x \in X, \exists -x \in \mathbb{K} : x + (-x) = 0_{\mathbb{K}}$.

2.3.2. Axiomas del producto

- 1) Asociatividad: $\forall x, y, z \in \mathbb{K}, (xy)z = x(yz)$.
- 2) Conmutatividad: $\forall x, y \in \mathbb{K}, xy = yx$.
- 3) Neutro: $\exists 1 \in \mathbb{K} - \{0\} : x \cdot 1 = x, \forall x \in X$.
- 4) Inverso: $\forall x \in X, \exists x^{-1} \in \mathbb{K} : x \cdot x^{-1} = 1_{\mathbb{K}}$.

Axioma de distributividad: $\forall x, y, z \in \mathbb{K}, x(y + z) = xy + xz$.

Ejemplo. \mathbb{Q}, \mathbb{Z}_2 .

2.3.3. Cuerpos Ordenados

Un cuerpo ordenado es un cuerpo \mathbb{K} que tiene un subconjunto $P \subseteq \mathbb{K}$ llamado conjunto de elementos positivos de \mathbb{K} que cumplen:

- 1) $x, y \in P \Rightarrow x + y \in P, xy \in P$.
- 2) $x \in \mathbb{K} \Rightarrow x \in P \vee -x \in P \vee x = 0$.

Ejemplo. \mathbb{Q} con $P = \{p/q : p, q \in \mathbb{N}\}$, \mathbb{Z}_2 no es ordenado.

Proposición 2.26. Dado un cuerpo ordenado si $a \neq 0 \Rightarrow a^2 \in P$.

En un cuerpo ordenado definimos $x < y$ para significar que $y - x \in P$.
La relación $<$ tiene las siguientes propiedades:

Proposición 2.27. Transitividad: $x < y$ y $y < z \Rightarrow x < z$.

Proposición 2.28. Tricotomía: $x, y \in \mathbb{K} \Rightarrow x = y \vee x < y \vee x > y$.

Proposición 2.29. Monotonía de la suma $x < y \Rightarrow x + z < y + z$.

Proposición 2.30. Monotonía del producto $x < y, 0 < z \Rightarrow xz < yz$.

En el cuerpo ordenado \mathbb{K} escribimos $x \leq y$ para significar $x < y \vee x = y$. O sea $y - x \in P \cup \{0\}$.
Con esta relación se cumplen todas las propiedades anteriores y la antisimetría. $x \leq y, y \leq x \Rightarrow x = y$.

Además tenemos la noción de intervalo, dados $a, b \in \mathbb{K}$ definimos $[a, b] = \{x \in \mathbb{K} : a \leq x \leq b\}$, $[a, b)$, $(a, b]$, (a, b) , $[a, +\infty)$, $(-\infty, b]$, $(a, +\infty)$, $(-\infty, b)$, $[a, a] = \{a\}$.

Un subconjunto de $X \subset \mathbb{K}$ se dice acotado inferiormente, superiormente si tiene cota inferior o cota superior. $\exists b \in \mathbb{K} : x \leq b, \forall x \in X$.

This page is intentionally left blank.

Clase II - 27/08

3.1 Cuerpo Arquimediano

Si \mathbb{K} es un cuerpo ordenado, $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{K}$, pero esto no necesariamente implica que \mathbb{N} es no acotado.

Ejemplo. $\mathbb{Q}(t)$: cuerpo de funciones racionales con coeficientes en \mathbb{Q} , $r(t) = p(t)/q(t)$, $p, q \in \mathbb{Q}$, $q \neq 0$. Este cuerpo puede ser ordenado diciendo que $r(t)$ es positivo si y sólo si el coeficiente de mayor grado del polinomio pq es positivo. En este cuerpo observemos que $p(t) = t = t/1$ cumple que $\forall n \in \mathbb{N}, p(t) = t - n \in \mathbb{P} \Rightarrow t > n, \forall n \in \mathbb{N}$. Es decir que en $\mathbb{Q}(t)$, \mathbb{N} es un conjunto acotado, por ejemplo por t .

Teorema 3.1. En un cuerpo ordenado \mathbb{K} son equivalentes:

- 1) $\mathbb{N} \subset \mathbb{K}$ no es acotado superiormente.
- 2) Dados $a, b \in \mathbb{K}$ con $a > 0$, $\exists n \in \mathbb{N} : m \cdot a > b$.
- 3) Dado cualquier $0 < a \in \mathbb{K}$, $\exists n \in \mathbb{N} : 0 < \frac{1}{a} < a$.

Cuando vale cualquiera decimos que \mathbb{K} es arquimediano.

Demostración. 1) \Rightarrow 2)

Como \mathbb{N} es no acotado, dados $a, b \in \mathbb{K}$, $a > 0$, $\exists m \in \mathbb{N} : m > \frac{b}{a}$, caso contrario $\frac{b}{a}$ sería cota de $\mathbb{N} \Rightarrow ma > b$

2) \Rightarrow 3)

Dado $a > 0$, $\exists n \in \mathbb{N} : na > 1$ (tomando $b = 1$ en 2.) $\Rightarrow a > \frac{1}{n} > 0$

3) \Rightarrow 1)

Dado $0 < a \in \mathbb{K} \Rightarrow \forall n \in \mathbb{N}, 0 < \frac{1}{n} < \frac{1}{a}$, pues 3. vale para todo $\mathbb{K} \Rightarrow b < n \Rightarrow$ es no acotado (pues ningún $b > 0$ puede ser cota superior). \square

3.2 Supremo e ínfimo

Definición 3.2. Dados un cuerpo ordenado \mathbb{K} y un subconjunto $X \subset \mathbb{K}$ acotado superiormente, decimos que $b \in \mathbb{K}$ es supremo de X si es la menor de las cotas superiores de X en \mathbb{K} .

Es decir, se cumple:

1. $\forall x \in X, x \leq b$

2. Si $c \in \mathbb{K}$ y $x \leq c, \forall x \in X \Rightarrow b \leq c$.
3. Dado $c < b$ en $\mathbb{K}, \exists x \in X : c < x$

Nota. 1) El supremo de un conjunto, si existe es único.

2) Si un conjunto tiene máximo, es el supremo.

3) Si $X = \emptyset$, todo $b \in \mathbb{K}$ es cota superior, como \mathbb{K} no tiene primer elemento, se sigue que \emptyset no tiene supremo en \mathbb{K} .

Definición 3.3. Dados un cuerpo ordenado \mathbb{K} y un subconjunto $X \subset \mathbb{K}$ acotado inferiormente, decimos que $b \in \mathbb{K}$ es ínfimo de X si es la mayor de las cotas inferiores de X en \mathbb{K} .

Es decir, se cumple:

1. $\forall x \in X, x \geq b$
2. Si $c \in \mathbb{K}$ y $x \geq c, \forall x \in X \Rightarrow b \geq c$.
3. Dado $c > b$ en $\mathbb{K}, \exists x \in X : b < x < c$.

Ejemplo. Dados $a < b$ en \mathbb{K} . Si $X = (a, b) \Rightarrow \inf(X) = a, \sup(X) = b$.

1) Por definición a es cota inferior y b superior.

2) $a < c \in \mathbb{K}$, no es cota inferior. En efecto, si $c \geq b$ trivial. Si $c < b \Rightarrow \frac{a+c}{2} \in X, a < \frac{a+c}{2} < c \Rightarrow a < c \therefore c$ no es cota inferior.

Luego por 1) y por 2) a es ínfimo de X .

Ejemplo. $Y = \{y \in \mathbb{Q} : y = \frac{1}{2^n}, n \in \mathbb{N}\}$. Veamos que $\inf(Y) = 0, \sup(Y) = \frac{1}{2}$.

$\frac{1}{2} \in Y, \frac{1}{2^n} < \frac{1}{2} \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \frac{1}{2} = \sup(Y)$.

Como $0 < \frac{1}{2^n} \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow 0$ es cota inferior. Sea $0 < c \in \mathbb{K}, 2^n = (1+1)^n \leq 1+n \leq \frac{1}{c} \Rightarrow n \leq \frac{1}{c} - 1 \Rightarrow \frac{1}{2^n} < c \Rightarrow c$ no puede ser cota inferior por la propiedad 3 de la arquimedianidad $\therefore 0$ es el ínfimo de Y .

El problema más serio de los racionales desde el punto de vista del análisis es que algunos conjuntos acotados de números racionales no tienen súpremo (o ínfimo) en \mathbb{Q} .

Ejemplo. Sean $X = \{x \in \mathbb{Q} : x \geq 0, x^2 < 2\}$, $Y = \{y \in \mathbb{Q} : y > 0, y^2 > 2\}$. Notemos que si $z > 2 \Rightarrow z^2 > 4 \Rightarrow z \notin X \Rightarrow X \subset [0, 2]$ y X es un conjunto acotado. Además $Y \subset (0, +\infty)$ por lo que es un conjunto acotado inferiormente. Veamos que \nexists súpremo e ínfimo en \mathbb{Q} .

1) Quiero ver que X no tiene máximo. Dado $x \in X$ quiero encontrar $r \in \mathbb{Q}$ tal que $0 < r < 1$ y $x + r \in X \iff (x + r)^2 = x^2 + 2xr + r^2 < 2$. Como $r < 1 \Rightarrow (x + r)^2 < x^2 + 2xr + r = x^2 + r(2x + 1) < 2 \therefore x + r \in X$.

2) Quiero ver que Y no tiene elemento mínimo, dado $y \in Y$ tomo $r \in \mathbb{Q} : 0 < r < \frac{y^2 - 2}{2y}$

$$(y - r)^2 = y^2 - 2yr + r^2 > y^2 - 2yr > 2 \quad (3.1)$$

$$y^2 - 2 > 2yr \quad (3.2)$$

$$\frac{y^2 - 2}{2y} > r \quad (3.3)$$

Es decir que $y - r \in Y$ e $y - r < y$

3) Si $x \in X, y \in Y \Rightarrow x < y, x^2 < 2 < y^2 \Rightarrow x^2 < y^2$.

Veamos que por 1, 2, 3 $\nexists \sup(X), \inf(Y)$. Supongamos $0 < \alpha = \sup(X)$, no puede ser $\alpha^2 < 2$ porque si no $\alpha \in X$ y X no tiene máximo. Tampoco puede ser $\alpha^2 > 2$ pues estaría en Y e Y no tiene mínimo, pues habría un $\beta \in Y$ con $\beta < \alpha$ y por 3) sería $x < \beta < \alpha, \forall x \in X$ lo que contradice que $\sup(X) = \alpha$, pues sería β el supremo. En definitiva si existiese $\sup(X) = \alpha$, debe ser $\alpha^2 = 2 \notin \mathbb{Q}$. Luego X no tiene supremo en \mathbb{Q} . Ínfimo, ejercicio (análogo).

3.3 Cuerpo completo

Definición 3.4. Si \mathbb{K} es un cuerpo ordenado no Arquimediano, $\mathbb{N} \subset \mathbb{K}$ es acotado superiormente.

si $b \in \mathbb{K}$ es una cota superior de $\mathbb{N} \Rightarrow n + 1 \in \mathbb{N} < b, \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow n < b - 1$ o sea $b - 1$ es cota superior de $\mathbb{N} \therefore \nexists \sup(\mathbb{N})$ en \mathbb{K} .

Definición 3.5. Un cuerpo ordenado \mathbb{K} se dice completo cuando dado un subconjunto no vacío y acotado superiormente tiene supremo en \mathbb{K} .

Nota. 1) Si el cuerpo es ordenado y completo \Rightarrow es arquimediano.

2) En un cuerpo ordenado completo \mathbb{K} todo subconjunto no vacío y acotado inferiormente tiene ínfimo en \mathbb{K} .

Demostración. Sea $Y \subset \mathbb{K}$, no vacío y acotado inferiormente. Sea $X = -Y = \{-y : y \in Y\} \Rightarrow X$ es no vacío y acotado superiormente $\Rightarrow \exists \sup(X) = a \Rightarrow -a = \inf(Y)$. \square

Axioma: Existe un cuerpo ordenado llamado \mathbb{R} .

Ejercicio: Dados $0 < a \in \mathbb{R}, m \in \mathbb{N} \Rightarrow \exists! 0 < b \in \mathbb{R} : b^m = a$. Sugerencia Definir $X = \{x \in \mathbb{R} : x \geq 0, x^n < a\}$, $Y = \{y \in \mathbb{R} : y > 0, y^n > a\}$ e imitar la demostración anterior. Probar y usar que dado $x > 0 \exists$ para cada $m \in \mathbb{N}$ un número real positivo que depende de x tal que

$$(x + d)^n \leq A_n d + x^n, \forall 0 < d < 1..$$

Definición 3.6. Un conjunto $X \subset \mathbb{R}$ se dice denso en \mathbb{R} si todo intervalo abierto (a, b) contiene algún punto de X .

Ejemplo. \mathbb{Q} es denso en \mathbb{R} .

Demostración. Como $b - a > 0, \exists p \in \mathbb{N} : 0 < \frac{1}{p} < b - a$.

Sea $A = \{m \in \mathbb{Z} : \frac{m}{p} \geq b\}$. Como \mathbb{R} es Arquimediano, A es un conjunto de números enteros no vacío y acotado por bp . Sea m_0 el menor elemento de A entonces $b \leq \frac{m_0}{p}$ y $\frac{m_0 - 1}{p} < b$. También $\frac{m_0 - 1}{p} > 0$, si no tendríamos que

$$\frac{m_0 - 1}{p} \leq a \leq b \leq \frac{m_0}{p} \quad (3.4)$$

Luego

$$b - a \leq \frac{m_0}{p} - \frac{m_0 - 1}{p} = \frac{1}{p} \quad (3.5)$$

Absurdo! $\therefore \mathbb{Q}$ es denso en \mathbb{R} . □

Ejemplo. $\mathbb{R} - \mathbb{Q}$ es denso en \mathbb{R} .

Para ver que $\mathbb{R} - \mathbb{Q}$ es denso usamos la misma idea tomando $p \in \mathbb{N} : 0 < \frac{1}{p} < \frac{b - a}{\sqrt{2}}$ por Arquimedianidad y $\frac{\sqrt{2}}{p} < b - a$ por longitud del intervalo. Ejercicio terminar la demostración.

3.4 Cardinalidad - introducción

Definición 3.7. Decimos que dos conjuntos X, Y tienen el mismo cardinal (coordinables o equipotentes) si $\exists f : X \rightarrow Y$ biyectiva. Notamos $X \sim Y$ o $\text{card}(X) = \text{card}(Y)$ o $\#X = \#Y$ y \sim es una relación de equivalencia.

Dado $n \in \mathbb{N}$ definimos $\mathbb{I}_n = \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Teorema 3.8. Sean $n, m \in \mathbb{N}$. Entonces, $\mathbb{I}_n \sim \mathbb{I}_m \iff n = m$.

Demostración. Sabemos que si $\mathbb{I}_n \sim \mathbb{I}_m$, entonces $\exists f : \mathbb{I}_n \rightarrow \mathbb{I}_m$ biyectiva. Supongamos que $n < m$.

Esto implica que puedo definir $g : \mathbb{I}_m \rightarrow \mathbb{I}_{n+1}$ suryectiva como:

$$g(k) = \begin{cases} k & \text{si } 1 \leq k \leq n+1, \\ 1 & \text{si } k > n+1. \end{cases}$$

$g \circ f : \mathbb{I}_n \rightarrow \mathbb{I}_{n+1} \Rightarrow$ basta probar que \nexists funciones $h : \mathbb{I}_n \rightarrow \mathbb{I}_{n+1}$ suryectivas para probar el absurdo. Por inducción:

Si $m = 1$ luego h no puede ser suryectiva. Supongamos que vale si $1 \leq k \leq n-1$, si $\exists h : \mathbb{I}_n \rightarrow \mathbb{I}_{n+1}$ suryectiva $\exists k : f(n) = k$. Defino una permutación r de \mathbb{I}_{n+1} tal que $r(k) = n+1 \Rightarrow$

$r \circ h : \mathbb{I}_n \rightarrow \mathbb{I}_{n+1}$ es suryectiva y $(r \circ f)(n) = r(k) = n+1$.

\Rightarrow la restricción $r \circ f|_{\mathbb{I}_{n-1}} : \mathbb{I}_{n-1} \rightarrow \mathbb{I}_n$ y es suryectiva. Abusdo, por Hipotesis inductiva no existen suryectivas de $\mathbb{I}_{n-1} \rightarrow \mathbb{I}_n$

\Leftarrow trivial. □

Definición 3.9. X es finito si $\exists n : X$ es coordinable con \mathbb{I}_n y escribimos $\text{card}(X) = n$. Decimos que X es infinito si no existe tal n .

This page is intentionally left blank.

Clase III - 30/08

4.1 Conjuntos numerables

Definición 4.1. Un conjunto X es numerable si $X \sim \mathbb{N}$. Cada biyección se llama una enumeración de los elementos de X .

Definición 4.2. Decimos que un conjunto es a lo sumo numerable (contable) si es finito numerable.

Ejemplo. Los números pares, $P = \{2n : n \in \mathbb{N}\}$.

Demostración. $f(n) = 2n$, $f : \mathbb{N} \rightarrow P$ es biyectiva \therefore es numerable. \square

Ejemplo. \mathbb{Z} es numerable.

Demostración. Definimos $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$ como $f(n) = \begin{cases} 2n & \text{si } n > 0, \\ -2n + 1 & \text{si } n \leq 0. \end{cases}$ y f^{-1} es una enumeración. \square

Teorema 4.3. Sea X un conjunto y $P(X) = \{A : A \subset X\} \Rightarrow \text{card}(X) \neq \text{card}(P)$

Demostración. Supongamos que $\exists f : X \rightarrow P(X)$ biyectiva, en particular, f es suryectiva.

Dado $x \in X$, puede pasar que $x \in f(X)$ o $x \notin f(X)$. Definimos $B = \{x \in X : x \notin f(X)\} \subset X$. Como f es suryectiva se tiene que $\exists y \in Y : f(y) = B$.

Si $y \notin B = f(y) \Rightarrow y \notin f(y) \Rightarrow y \in B$.

Si $y \in B = f(y) \Rightarrow y \in f(y) \Rightarrow y \notin B$.

Absurdo en ambos casos, luego $\nexists f$ biyectiva $\therefore \text{card}(X) \neq \text{card}(P)$. \square

Definición 4.4. Decimos que $\text{card}(X) \leq \text{card}(Y)$ si $\exists f : X \rightarrow Y$ inyectiva. $\text{card}(X) < \text{card}(Y)$ si $\text{card}(X) < \text{card}(Y)$, pero $\neg(X \sim Y)$.

Proposición 4.5. Es una relación de orden

- Demostración.** i) $\text{card}(X) \leq \text{card}(X)$ porque la identidad es inyectiva.
 ii) $\text{card}(X) \leq \text{card}(Y)$, $\text{card}(Y) \leq \text{card}(Z) \Rightarrow \text{card}(X) \leq \text{card}(Z)$ pues la composición de funciones es inyectiva.
 iii) $\text{card}(X) = \text{card}(Y) \Rightarrow X \sim Y$. □

4.2 Cantor - Schröder - Bernstein

Teorema 4.6 (Cantor - Schröder - Bernstein). Si $\exists f : X \rightarrow Y$ y $g : Y \rightarrow X$ inyectivas $\Rightarrow \exists h : X \rightarrow Y$ biyectiva.

Demostración. Vamos a probar que existen dos particiones distintas de X e Y . Sea $X = X_1 \cup X_2$ y $Y = Y_1 \cup Y_2$: $f : X_1 \rightarrow Y_1$ y $g : X_2 \rightarrow Y_2$ son biyectivas.

Podemos definir a $h : X \rightarrow Y$ como $h(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si } x \in X_1, \\ g^{-1}(x) & \text{si } x \in X_2. \end{cases}$ y resulta biyectiva.

Definimos $\phi(x) : P(X) \rightarrow P(X)$, $\phi(A) = X - g(Y - f(A))$. Veamos primero que ϕ es creciente (i.e $A \subseteq B \Rightarrow \phi(A) \subseteq \phi(B)$).

Demostración. $A \subseteq B \iff f(A) \subseteq f(B) \iff Y - f(B) \subseteq Y - f(A) \iff g(Y - f(B)) \subseteq g(Y - f(A)) \iff X - \phi(A) \subseteq X - \phi(B)$ □

Sea $\mathcal{C} = \{C \subset X : \phi(C) \subset C\} \neq \emptyset$ pues $X \in \mathcal{C}$ y $A = \bigcap_{C \in \mathcal{C}} C \neq \emptyset$, $A \subset C, \forall C \in \mathcal{C}$ y ϕ es creciente y tenemos que $\phi(C) \subset C \Rightarrow \phi(A) \subset \phi(C) \subset C \Rightarrow \phi(C) \in \mathcal{C}$. Además, usando otra vez que ϕ es creciente, $\phi(\phi(A)) \subset \phi(A) \Rightarrow \phi(A) \in \mathcal{C} \Rightarrow A \subset \phi(A) \Rightarrow A = \phi(A)$.

Sean $X_1 = A$, $X - X_1 = X_2 = g_2(Y_2)$

$Y_1 = f(A)$, $Y_2 = Y - f(A) \Rightarrow$

$A = \phi(A) = X - g(Y - f(A)) \iff X - A = g(Y - f(A)) \iff X - X_1 = g(Y_2) = X_2 \therefore f : X_1 \rightarrow Y_1$ y $g : X_2 \rightarrow Y_2$ son biyectivas. □

Ejemplo. $\mathbb{N} \sim \mathbb{Z} \sim \mathbb{Q}$.

Demostración. $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Q}$, $f(x) = x$ es inyectiva.

Sea $a \in \mathbb{Z}$, $b \in \mathbb{N}$, $f : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Z}$, $f(\frac{a}{b}) = \text{sign}(a) \cdot 2^a \cdot 3^b$ es inyectiva por Teorema Fundamental de la Aritmética. Luego por el teorema anterior $\mathbb{Z} \sim \mathbb{Q}$. □

Ejemplo. $(\mathbb{N} \times \mathbb{N})$ es numerable.

Demostración. $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N}$, $f(n) = (1, n)$ es inyectiva. $f : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, $f((n, m)) = 2^n \cdot 3^m$ es inyectiva por Teorema Fundamental de la Aritmética \therefore es numerable. \square

4.3 Los Reales son no numerables

Teorema 4.7. \mathbb{R} no es numerable.

Demostración. Supongamos que es numerable. \Rightarrow

$\exists f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ biyectiva. A cada número real x_n le asignamos un intervalo centrado en ese punto de longitud 2^{-n} . La unión de todos esos intervalos tiene longitud menor o igual a la suma de las longitudes (se pueden superponer).

$|\bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_{x_n}| \leq \sum_{i=1}^{\infty} |I_{x_n}| = \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{1}{2^n} = 1$. Se cubrió un intervalo de longitud 1 de toda la recta real, por lo tanto quedan reales afuera y eso es un absurdo $\therefore \mathbb{R}$ no es numerable. \square

Ejemplo. $A = \{(a_n)_{n \geq 1} : a_n \in \{0, 1\}\} = \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$. Es decir las sucesiones de ceros y unos no es un conjunto numerable.

Demostración. Supongamos que si es numerable \Rightarrow podemos escribir

$A = \{(a_n^1)_{n \geq 1}, \dots, (a_n^j)_{n \geq 1}, \dots\}$, todas las sucesiones de ceros y unos están contenidas en A . La sucesión donde $a_i = 1 - a_n^i$ (en el i -ésimo lugar tiene lo contrario de lo que la n -ésima sucesión tiene en el lugar n) debería ser una de ellas, pero eso es absurdo \therefore es no numerable. \square

La idea del último ejemplo (argumento diagonal), se puede adaptar para probar que $(0, 1]$ es no numerable.

4.3.1. Principio de encaje de Intervalos

Teorema 4.8. Sea $\mathbb{I}_1 \supset \mathbb{I}_2 \supset \mathbb{I}_3 \supset \dots$ una sucesión de intervalos cerrados y acotados

$\mathbb{I}_n = [a_n, b_n] \Rightarrow$

La intersección de todos es no vacía.

$\bigcap_{n=1}^{\infty} \mathbb{I}_n = [a, b]$ con $a = \sup(a_n)$, $b = \inf(b_n)$.

Demostración. $\forall n \in \mathbb{N}, \exists I_{n+1} \subset I_n \Rightarrow a_n \leq a_{n+1} \leq b_{n+1} \leq b_n$

$a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq b_n \leq \dots \leq b_1$. El conjunto A de los a_i está acotado y B el conjunto de los b_i también.

Sea $\alpha = \sup(A)$, $\beta = \inf(B)$. Como $a_n \leq b_n, \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \alpha \leq \beta \Rightarrow a_1 \leq \dots \leq a_1 \leq \alpha \leq \beta \leq \dots \leq b_1$.

Luego $[\alpha, \beta] \subset I_n \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \bigcap_{n \geq 1} I_n$.

Además ningún $x \leq \alpha$ puede pertenecer a todos los I_n . En efecto, si $x < \alpha = \sup(A) \Rightarrow \exists a_1 \in A : x < a_1 \Rightarrow x \notin I_n$.

Análogamente con el ínfimo. □

Teorema 4.9. \mathbb{R} no es numerable.

Demostración. Supongamos que $\exists f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} : f(n) = x_n$.

Definimos la sucesión de I_n de la siguiente forma:

Tomamos $[0, 1]$ y divido en 3 cerrados iguales, luego, al menos uno no contiene a x_1 , lo elijo como I_1 (si hay dos que no lo contienen elijo alguno). Inductivamente lo divido en 3 intervalos iguales y al menos 1 de ellos no contiene a x_{n+1} y lo elijo como I_{n+1} . Por el principio anterior la $I = \bigcap_{n=1}^{\infty} I_n \neq \emptyset$ (tiene un único elemento y la longitud de los intervalos tiende a cero).

Si $x \in I$ no puede ser igual o mayor que x_1 (por construcción se los excluye en algún paso) $\Rightarrow \mathbb{R}$ es no numerable, pues ese x queda afuera. □

4.4 Propiedades

Teorema 4.10. Sea X numerable, $Y \subset X \Rightarrow Y$ es a lo sumo numerable.

Demostración. Supongamos que Y no es finito. Como $X \sim Y$ puedo pensar $X = (x_n)_{n \geq 1}$ y defino $n_1 = \min\{n \in \mathbb{N} : x_n \in Y\}$ e inductivamente elegimos $n_1, n_2, \dots, n_k, \dots$. Definimos $n_k = \min\{n \in \mathbb{N} : n > n_k, x_n \in Y\} \Rightarrow$ Tenemos la sucesión estrictamente creciente de naturales y podemos definir $g : \mathbb{N} \rightarrow Y, g(k) = x_{n_k}$. g es inyectiva si $k \neq j, n_k \neq n_j$ por ser estrictamente creciente y es suryectiva, si $y \in Y \Rightarrow y = x_j$. Para ningún $j \Rightarrow \exists k : n_k \leq j \leq n_k + 1$. Como $j \leq n_{k+1} = \min\{n > n_k : x_n \in Y\}$ debe ser $j = n_k$. □

Corolario 4.11. $f : X \rightarrow Y$ inyectiva e Y numerable $\Rightarrow X$ es a lo sumo numerable.

Demostración. f es inyectiva $\Rightarrow X \sim f(X)$ y como $f(X) \subset Y \Rightarrow$ es a lo sumo numerable por el teorema anterior. □

Teorema 4.12. $f : X \rightarrow Y$ suryectiva, X a lo sumo numerable $\Rightarrow Y$ es a lo sumo numerable.

Demostración. $f : X \rightarrow Y$ es suryectiva $\exists g : Y \rightarrow X$ inversa a derecha tal que $f \circ g = \text{id}_Y \Rightarrow f$ es inversa a izquierda de $g \Rightarrow g$ es inyectiva \therefore por el corolario anterior Y es a lo sumo numerable. \square

Teorema 4.13. Para cada $m \in \mathbb{N}$. Sea x_n un conjunto numerable $\Rightarrow \bigcup_{n \in \mathbb{N}} x_n = X$ es numerable.

Demostración. x_n es numerable $\Rightarrow \exists f : \mathbb{N} \rightarrow x_n$ biyectiva. Sea $f : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \bigcup_{n \in \mathbb{N}} x_n$ definida como $f(n, n) = f_n(n)$. Veamos que es suryectiva, dado $x \in X$, $\exists n \in \mathbb{N} : x \in x_n \Rightarrow \exists m : x = f_n(m)$ luego $x = f_n(m) = f(n, m)$. Como $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ es numerable y $f : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \bigcup_{n \geq 1} x_n$ es suryectiva $\Rightarrow \bigcup_{n \geq 1} x_n$ es a lo sumo numerable \therefore como es infinito, es numerable. \square

Ejemplo. $\mathbb{Q}(x) \sim \mathbb{N}$.

Demostración. $\mathbb{Q}_k[x] = \{p \in \mathbb{Q}(x) : \text{gr}(p) \leq k\}$ tenemos $f_n : \mathbb{Q}^{n+1} \rightarrow \mathbb{Q}_n[x]$, $f(a_0, \dots, a_{n+1}) = a_0 + \dots + a_n x^n$, cada f_n es biyectiva $\Rightarrow \mathbb{Q}^{n+1}$ es numerable y como la unión numerable de conjuntos numerables es numerable $\therefore \mathbb{Q}(x)$ es numerable. \square

Definición 4.14. Un número se dice algebraico si es raíz de algún polinomio con coeficientes enteros, por ejemplo $\sqrt{2}$ es raíz de $x^2 = 2$.

Definición 4.15. Si un número real no es algebraico se lo llama trascendente.

Ejercicio: demostrar que el conjunto de números algebraicos es numerable.

This page is intentionally left blank.

Clase IV - 03/09

5.1 Operaciones con cardinales

Dados dos cardinales n, m (no necesariamente finitos) y X, Y conjuntos disjuntos tales que $\text{card}(X) = n$, $\text{card}(Y) = m$, podemos definir:

- 1) **Suma:** $n + m = \text{card}(X \cup Y)$.
- 2) **Producto:** $n \cdot m = \text{card}(X \times Y)$.
- 3) **Potencia:** $n^m = \text{card}(\{f : Y \rightarrow X\}) = \text{card}(X^Y)$.

Nota. Suponer que $X \cap Y = \emptyset$ no es restrictivo porque $X \sim (X \times \{1\})$ e $Y \sim (Y \times \{2\})$, y $(X \times \{1\}) \sim (Y \times \{2\})$ y son disjuntos.

Nota. Hay que probar que la definición es independiente de los conjuntos X, Y que elegimos. Si $n = \text{card}(\tilde{X})$ y $m = \text{card}(\tilde{Y})$, $\tilde{X} \cap \tilde{Y} = \emptyset \Rightarrow n + m = \text{card}(\tilde{X} \cup \tilde{Y})$. Vale porque existen biyecciones entre \tilde{X} y X y entre \tilde{Y} y Y . Sea $f : X \rightarrow \tilde{X}$, $g : Y \rightarrow \tilde{Y}$ con lo cual $h : X \cup Y \rightarrow \tilde{X} \cup \tilde{Y}$ dada por

$$h(z) = \begin{cases} f(z) & \text{si } z \in X, \\ g(z) & \text{si } z \in Y. \end{cases}$$

es biyectiva. Similar para el producto y la potencia.

Supongamos $\text{card}(X) = n$, $\text{card}(Y) = m$, $\text{card}(Z) = p$, no necesariamente finitos con X, Y, Z disjuntos dos a dos. La suma cumple las siguientes propiedades:

- Proposición 5.1.** 1) Conmutatividad: $n + m = m + n$, pues $X \cup Y = Y \cup X$.
2) Asociatividad: $(n + m) + p = n + (m + p)$.
3) Existencia del neutro: $0 + n = n$, $\emptyset \cup X = X$.

El producto cumple las siguientes propiedades:

- Proposición 5.2.** 1) Conmutatividad: $n \cdot m = m \cdot n$, pues $X \times Y \sim Y \times X$.
2) $0 \cdot n = 0$, pues $\emptyset \times X = \emptyset$.
3) $1 \cdot n = n$, pues $\{1\} \times X \sim X$. Aquí, $f : \{1\} \times X \rightarrow X$ saca el 1 y $g : X \rightarrow \{1\} \times X$ agrega el 1. Ambas funciones son biyectivas.

Proposición 5.3. Distributiva del producto en la suma: $n \cdot (m + p) = n \cdot m + n \cdot p$ porque $X \times (Y \cup Z) \sim (X \times Y) \cup (X \times Z)$.

Nota. No vale la ley de cancelación: $n + m = n + p \not\Rightarrow m = p$. $n \cdot m = n \cdot p \not\Rightarrow m = p$.

Ejemplo. Si $n = \text{card}(\mathbb{N}) = \aleph_0$ y $\text{card}(\mathbb{R}) = c$, tenemos que:

a) $n + n = \aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$.

$n \cdot n = \aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0$.

b) $c \cdot c = c$.

$c + c = c$.

Demostración. a) Vimos que $\text{card}(\{2n : n \in \mathbb{N}\}) = \aleph_0$, $\text{card}(\{2n + 1 : n \in \mathbb{N}\}) = \aleph_0$. Y la unión de ambos conjuntos es \mathbb{N} . Además $\mathbb{N} \times \mathbb{N} = \aleph_0$, así $\aleph_0 \cdot \aleph_0 = \aleph_0$.

b) Si pruebo que el cardinal de cualquier intervalo no degenerado (sin extremos iguales) de la recta es c , puedo probar que $c + c = c$ observando que $(0, 1) = (0, \frac{1}{2}) \cup (\frac{1}{2}, 1)$.

En efecto, $\arctan(x)$ es una biyección entre \mathbb{R} y el intervalo $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, y hay una biyección entre este intervalo y cualquier (a, b) dada por $y = \frac{b-a}{\pi} \cdot (x + \frac{\pi}{2}) + a$.

Además, $(0, 1)$ y $[0, 1]$ son coordinables. Si $f : [0, 1] \rightarrow (0, 1)$ es inyectiva y por el Teorema de Cantor-Bernstein $[0, 1] \sim (0, 1)$.

Para probar $c \cdot c = c$, uso que $(0, 1] \times (0, 1] \sim (0, 1]$.

Sea $g : (0, 1] \rightarrow (0, 1] \times (0, 1]$, $g(x) = (x, 1)$ es inyectiva.

$f : (0, 1] \times (0, 1] \rightarrow (0, 1]$, $f(x, y) = 0.x_1y_1x_2y_2 \dots$ (primeros decimales).

Si $x, y \in (0, 1]$, los pensamos con desarrollo decimal infinito. Como f es inyectiva, por el Teorema de Cantor-Bernstein, existe una biyección entre ellos, por lo que $c \cdot c = c$. \square

Sean $n = \text{card}(X)$, $m = \text{card}(Y)$, $p = \text{card}(Z)$, no necesariamente finitos, con X, Y, Z disjuntos dos a dos.

Proposición 5.4. $n^m \cdot n^p = n^{m+p}$

Demostración. $X^Y \times X^Z \sim X^{Y \cup Z}$.

$X^Y \times X^Z = \{(f, g) : f : Y \rightarrow X, g : Z \rightarrow X\}$.

$f \in X^{Y \cup Z}, f : Y \cup Z \rightarrow X \Rightarrow (f|_Y, f|_Z) \in X^Y \times X^Z$ inyectiva.

Dadas $f : Y \rightarrow X, g : Z \rightarrow X, h : Y \cup Z \rightarrow X$ tal que $h(x) = \begin{cases} f(x) & \text{si } x \in Y, \\ g(x) & \text{si } x \in Z \end{cases}$

Como Y, Z son disjuntos por hipótesis h es inyectiva y vale por Teorema CSB.

\square

Proposición 5.5. $(n^m)^p = n^{mp}$

Demostración. $f \in (X^Y)^Z, f : Z \rightarrow X^Y, Z \mapsto (f_Z : Y \rightarrow X).$
 $(\forall z \in Z)(\exists f_Z : Y \rightarrow X), \text{ si } y \in Y, f_Z(y) \text{ es } g(z, y) = f_Z(y)$ □

Teorema 5.6. Sea $n = \aleph_0$ o c y sea m otro cardinal tal que $2 \leq m \leq 2^n \Rightarrow m^n = 2^n$.
 $(2^{\aleph_0}) = (2^{\aleph_0})^{\aleph_0}$.

Demostración. En general si $m \leq p \Rightarrow m^m \leq p^n$ con $\text{card}(X) = m, \text{card}(Y) = m,$
 $\text{card}(Z) = p, X, Y, Z$ disjuntos dos a dos.

$f : Y \rightarrow Z$ es inyectiva $\Rightarrow \forall g : X \rightarrow Y$ tenemos que $f \circ g : X \rightarrow Z$ de manera inyectiva
(si $g_1 \neq g_2 \Rightarrow f \circ g_1 \neq f \circ g_2$ porque f es inyectiva). □

Nota. $\{0, 1\}^{\mathbb{N}} \sim P(\mathbb{N})$ pues a cada $f : \mathbb{N} \rightarrow \{0, 1\}$ le asigno el subconjunto $A \subset \mathbb{N}$ definido
por $n \in A \iff f(n) = 1$

Teorema 5.7. $\mathbb{R} \sim \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ es decir $2^{\aleph_0} = c$.

Demostración. $f : [0, 1] \rightarrow \{0, 1\}^{\mathbb{N}}, f(x) = (x_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Siendo x_n las cifras del desarrollo
en base dos de x .

Tenemos que $x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x_n}{2^n} \Rightarrow f$ es inyectiva xq el desarrollo es único.

Ahora si $g : \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \rightarrow [0, 1], g((x_n)_{n \in \mathbb{N}}) = \sum_{n \geq 1} \frac{x_n}{3^n}, x_n \in \{0, 1\}$. No es inyectiva pues
 $0, 11 = 0, 10\bar{1}$. Una forma simple es pensar el desarrollo en base 3 de cada tira de 0 y
1 que no tiene ningún dos. Es decir $g((x_n)_{n \in \mathbb{N}}) = \sum_{n \geq 1} \frac{x_n}{3^n}$ y $(0, 11)_3 \neq (0, 10\bar{1})_3 \therefore$ es
inyectiva y por Teorema CSB: $\mathbb{R} \sim \{0, 1\}^{\aleph_0}$.

Otra forma es la siguiente: $S = \{0, 1\}^{\mathbb{N}} - \bigcup_{i=1}^n S_i$ con $S_i = \{(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \{0, 1\}^{\mathbb{N}} : x_m =$
 $0, \forall m > i\}$. O sea $0, 11000 \dots$ se saca y queda solo $0, 10\bar{1}$. Cada S_i es un conjunto finito
(tiene 2^i elementos) luego $\bigcup_{i \geq 1} S_i$ es numerable $\therefore S$ y $\{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ tienen el mismo cardinal.

$g((x_n)_{n \in \mathbb{N}}) = \sum_{n \geq 1} \frac{x_n}{2^n}$ si es inyectiva y $g : S \rightarrow [0, 1]$. □

5.2 Hipótesis del continuo

\nexists cardinal entre \aleph_0 y $c = 2^{\aleph_0}$. No se puede demostrar ni refutar.

Es independiente de la teoría de conjuntos más el axioma de elección. Gödel 1940 probó que
no se puede demostrar, Cohen en 1963 que no se puede refutar.

5.3 Construcción de los Reales

Sucesiones de números racionales $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{Q}$.

Sea $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{Q}$ decimos que tiende a 0 si dado $\varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : |a_n| < \varepsilon, \forall n > n_0$. Notamos $a_n \rightarrow 0$.

Definición 5.8. Sea $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{Q}$. Decimos que la sucesión es de Cauchy \iff dado $\varepsilon > 0, \exists n_0 : \forall n, m > n_0, |a_n - a_m| < \varepsilon$.

Teorema 5.9. $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{Q}$ es convergente (es decir $a_n - q \rightarrow 0, q \in \mathbb{Q}$) \Rightarrow es de Cauchy.

Demostración. Dado $\varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : |a_n - q| < \frac{\varepsilon}{2}, \forall n > n_0$.

$$|a_n - a_m| = |(a_n - q) + (q - a_m)| \leq |a_n - q| + |q - a_m| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$$

$\forall n, m > n_0$. □

Teorema 5.10. Toda sucesión de Cauchy es acotada.

Demostración. Como $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{Q}$ es de Cauchy, eligiendo $\varepsilon = 1$

$$\exists n_0 \in \mathbb{N} : |a_n - a_m| < 1, \forall n, m > n_0.$$

En particular $|a_n - a_{n_0+1}| < 1$

$$a_{n_0+1} - 1 < a_n < 1 + a_{n_0+1}, \forall n > n_0 \Rightarrow |a_n| < \max(|a_{n_0+1} + 1|, |a_{n_0+1} - 1|), \forall n > n_0.$$

Tomo $M = \max(|a_0|, \dots, |a_{n_0}|, |a_{n_0+1} + 1|, |a_{n_0+1} - 1|)$ y vale $\forall n \in \mathbb{N}$. □

Definición 5.11. Sea $\mathcal{C}_{\mathbb{Q}}$ el conjunto de todas las sucesiones de Cauchy de números racionales. Dados $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}, (b_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{C}_{\mathbb{Q}}$. Decimos que son equivalentes $\iff a_n - b_n \rightarrow 0$.

Proposición 5.12. La relación anterior es de equivalencia.

i) Reflexidad: $a_n - a_n = 0 \rightarrow 0$.

ii) Simetría: $a_n - b_n \rightarrow 0 \Rightarrow b_n - a_n = -(a_n - b_n) \rightarrow 0$.

iii) Transitividad: $\varepsilon > 0, \exists n_0 : |a_n - b_n| < \frac{\varepsilon}{2}, \forall n > n_0$ y $\exists n_1 : |b_n - c_n| < \frac{\varepsilon}{2}, \forall n > n_1$.

Tomando $n > \max(n_0, n_1), |a_n - c_n| \leq |a_n - b_n| + |b_n - c_n| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$.

Definición 5.13. Los números reales \mathbb{R} son las clases de equivalencia $[(a_n)]$ de las sucesiones $\mathcal{C}_{\mathbb{Q}}$ por la relación anterior.

This page is intentionally left blank.

Clase V - 06/09

6.1 Construcción de los Reales

Nota. Dado $q \in \mathbb{Q}$ definimos \tilde{q} como la clase de equivalencia de la sucesión constante como $(q, q, q, \dots) \Rightarrow \mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$.

Definición 6.1. $\tilde{s}, \tilde{t} \in \mathbb{R}$, $s = [(a_n)], t = [(b_n)]$ definimos $s + t = [(a_n + b_n)]$ la clase de equivalencia de $(a_n + b_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

$s \cdot t = [(a_n b_n)]$ la clase de equivalencia de $(a_n b_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Veamos que están bien definidas, si $[(a_n)] = [(c_n)]$ y $[(b_n)] = [(d_n)]$.

$a_n - c_n \rightarrow 0$ y $b_n - d_n \rightarrow 0$.

$([a_n] + [b_n]) - ([c_n] + [d_n]) = ([a_n] - [c_n]) + ([b_n] - [d_n]) = 0 \Rightarrow$ la suma está bien definida.

$a_n b_n - c_n d_n = a_n b_n - c_n b_n + c_n b_n - c_n d_n = b_n(a_n - c_n) + c_n(b_n - d_n) \Rightarrow |a_n \cdot b_n - c_n \cdot b_n| \leq |b_n| |a_n - c_n| + |c_n| |b_n - d_n|$.

Como $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ y $(c_n)_{n \in \mathbb{N}}$ están acotadas $\exists M : |b_n| < M, |c_n| < M, \forall n \in \mathbb{N}$.

$|a_n b_n - c_n b_n| \leq M(|a_n - c_n| + |b_n - d_n|) < \varepsilon, \forall n > n_0$.

Porque $a_n - c_n \rightarrow 0, b_n - d_n \rightarrow 0$.

Proposición 6.2. \mathbb{R} es un cuerpo con esta definición.

Demostración. Ejercicio.

□

Teorema 6.3. Dado $S \in \mathbb{R} - \{0\}, \exists t \in \mathbb{R} : s \cdot t = 1$.

Demostración. $S = [(a_n)]$ sabemos que $S \notin \tilde{0}$, o sea $a_n \not\rightarrow 0$. Podría pasar que algunos de los terminos de $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ si sean 0 , lo que pasa es que $a_n \neq 0$. para n lo suficiente grande.

Como $a_n \not\rightarrow 0$, $\exists \varepsilon_1 > 0, \exists$ infinitos valores de $M : |a_M - 0| > \varepsilon_1$, si $\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{2}$, como $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es de cauchy, $\exists n : |a_n - a_m| < \frac{\varepsilon}{2}, \forall n, m > n_0$.

Si $M > n_0$ (puedo porque son infinitos) : $|a_M| > \varepsilon_1 \Rightarrow |a_m - a_M| < \frac{\varepsilon_1}{2}, \forall m > n_0$.

$-\varepsilon_1/2 < a_n - a_m < \varepsilon_1/2$ o $-\varepsilon_1/2 < a_m - a_n < \varepsilon_1/2$.

Si $a_M > 0 \Rightarrow \frac{\varepsilon_1}{2} < a_M - \frac{\varepsilon_1}{2} < a_n < a_M + \frac{\varepsilon_1}{2}, \forall n > n_0$.

Si $a_M < 0, \frac{\varepsilon_1}{2} < -a_M - \frac{\varepsilon_1}{2} < -a_n < -a_m + \frac{\varepsilon_1}{2} \Rightarrow a_n < -\frac{\varepsilon_1}{2}, \forall n > n_0$.

O sea que $\forall n > n_0, a_n$ tiene el mismo signo que a_M en particular $a_n \neq 0, \forall n > n_0$.

Sabiendo esto veamos que \exists el inverso:

$S = [(a_n)] \neq 0$ por lo anterior $\exists n_0 : a_n \neq 0, \forall n > n_0$.

Sea $(b_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{Q}$ como

$$b_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n < n_0, \\ \frac{1}{a_n} & \text{si } n > n_0. \end{cases} \Rightarrow$$

$$a_n b_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n < n_0, \\ 1 & \text{si } n > n_0, \end{cases} \Rightarrow$$

$(1, 1, \dots) - (a_n \cdot b_n)_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow 0 \therefore [(a_n b_n)] = [(1, 1, \dots)]$, es decir $t = [(b_n)]$ cumple que $t \cdot s = 1$. \square

6.2 Cuerpo ordenado

Para probar que \mathbb{R} es un cuerpo ordenado bajo esta definición hay que definir qué es ser positivo.

Sea $s \in \mathbb{R}$ decimos que s es positivo si $s \neq 0$ y $s = [(a_n)]$ tal que $a_n > 0 \forall n > n_0$. O sea, todos los terminos son positivos a partir de un punto.

Definición 6.4. Decimos que $s > t$ si $s - t > 0$. Ejercicio probar que está bien definido.

Veamos un ejemplo de como se prueban los axiomas de orden.

Teorema 6.5. Sean $s, t \in \mathbb{R} : s > t, r \in \mathbb{R} \Rightarrow s + r > t + r$.

Demostración. $s = [(a_n)], t = [(b_n)], r = [(c_n)]$.

Como $s > t, \exists n_0 : a_n - b_n > 0, \forall n > n_0, a_n - b_n \not\rightarrow 0 \Rightarrow (a_n + c_n) - (b_n + c_n) = a_n + b_n > 0$ y $(a_n + c_n) - (b_n + c_n) \not\rightarrow 0 \Rightarrow s + r - (t + r) > 0 \Rightarrow s + r > t + r$. \square

Teorema 6.6. \mathbb{R} con esta construcción es Arquimediano.

Demostración. Sean $s, t > 0, s, t \in \mathbb{R}$ quiero ver que $\exists m \in \mathbb{N} : m \cdot s > t$.

Es decir si $s = [(a_n)], t = [(b_n)]$ quiero ver que $[(m \cdot a_n)] > [(b_n)]$. O sea que $m \cdot a_n - b_n \not\rightarrow 0$ y que $\exists n_0 : m \cdot a_n - b_n > 0, \forall n > n_0$.

Supongamos que $\forall m, n_0, \exists n > n_0 : m \cdot a_n \leq b_n$. Como $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es de Cauchy $\Rightarrow \exists M \in \mathbb{Q} : b_n < M, \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow$

$$a_n \leq \frac{b_n}{m} \leq \frac{M}{m}, \text{ para algún } n > n_0, \forall n_0.$$

Como \mathbb{Q} es arquimediano, dado $\varepsilon > 0, \exists m : \frac{M}{m} < \frac{\varepsilon}{2}$, elijo m así y tengo que

$$a_n \leq \frac{b_n}{m} < \frac{M}{m} < \frac{\varepsilon}{2}, n > n_0, \forall n_0.$$

Como $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es de Cauchy $\exists n_0 : \forall n, k > n_0, |a_n - a_k| < \varepsilon/2$. Para este n_0, \exists algún $n > n_0$ tal que $a_n < \varepsilon/2 \Rightarrow$

$\forall k > n_0, a_k - a_n < \varepsilon/2 \Rightarrow a_k < a_n + \varepsilon/2 < \varepsilon/2 + \varepsilon/2 < \varepsilon \Rightarrow a_n \rightarrow 0$. Absurdo!
 $[(a_n)] = S > 0$.

Luego $\exists m \in \mathbb{N} : m \cdot a_n - b_n > 0, \forall n > n_0$. Queda ver que $m \cdot a_n - b_n \not\rightarrow 0$, si $m \cdot a_n - b_n \rightarrow 0$ nada que probar. Caso contrario tomamos $m+1$ en vez de m .

$(m+1) \cdot a_n - b_n = m \cdot a_n + a_n - b_n > a_n > 0, \forall n > n_0 \Rightarrow m \cdot a_n - b_n \rightarrow 0$ y $a_n \not\rightarrow 0 \therefore \mathbb{R}$ es arquimediano. \square

Teorema 6.7. \mathbb{Q} es denso en \mathbb{R} . Es decir dado $r \in \mathbb{R}$ y $\varepsilon > 0, \exists q \in \mathbb{Q} : |r - q| < \varepsilon$.
 $r = [(a_n)],$ con $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{Q}$ es de Cauchy.

Demostración. Dado $\varepsilon > 0, \exists n_0 : |a_n - a_m| < \varepsilon, \forall n, m > n_0$.

Elijo algún $l > n_0$ y defino $q = [(a_l, a_l, \dots)] \Rightarrow r - q = [(a_n - a_l)]$ y $q - r = [(a_l - a_n)]$.

Como $l > n_0 \Rightarrow (\forall n > n_0)(a_n - a_l < \varepsilon)(a_l - a_n < \varepsilon) \Rightarrow |r - q| < \varepsilon$. \square

6.3 \mathbb{R} tiene la propiedad del supremo

Sea $S \subset \mathbb{R}, S \neq \emptyset, M$ cota superior de S . Vamos a construir dos sucesiones $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}, (l_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Como $S \neq \emptyset, \exists s_0 \in S$. Defino $u_0 = M, l_0 = s_0$.

Si ya están definidos u_m, l_m , llamo $m_n = \frac{l_n + u_n}{2}$ al punto medio.

i) Si m_n es cota superior de S definimos $u_{m+1} = m_n, l_{n+1} = l_n$.

ii) Si m_n no es cota superior de S definimos $u_{n+1} = u_n$ y $l_{n+1} = m_n$.

Como $s_0 < M$ es fácil ver que $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es decreciente y que $(l_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es creciente. Queda como ejercicio demostrarlo.

Lema 6.8. $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ y $(l_n)_{n \in \mathbb{N}}$ son sucesiones de Cauchy de números reales.

Demostración. Por construcción se tiene que $l_n \leq M, \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow (l_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es creciente y acotada \Rightarrow Es de Cauchy.

Como $u_n > s_0, \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow -u_n \leq s_0, (-u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es creciente \Rightarrow Es de Cauchy.

*

Demostración. Supongamos que $(l_n)_{n \in \mathbb{N}}$ no es de Cauchy. Entonces existe $\varepsilon > 0 :$
 $\forall n_0, \exists n, m \geq n_0 : l_n - l_m \geq \varepsilon.$

Como $(l_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es creciente, $l_n - l_{n_0} \geq \varepsilon$, inductivamente consigo:

$$n_1 > n_0 : l_{n_1} - l_{n_0} \geq \varepsilon$$

$$n_2 > n_1 : l_{n_2} - l_{n_1} \geq \varepsilon$$

\vdots

Por otro lado por la arquimedianidad $\exists k \in \mathbb{N} : k \cdot \varepsilon > M - l_{n_0} \Rightarrow$

$$l_{n_k} - l_{n_0} = (l_{n_k} - l_{n_{k-1}}) + (l_{n_{k-1}} - l_{n_{k-2}}) + \cdots + (l_{n_1} - l_{n_0}) > k \cdot \varepsilon > M - l_{n_0} \Rightarrow l_{n_k} > M. \text{ Absurdo!} \quad \square$$

\square

Lema 6.9. $\exists u \in \mathbb{R} : u_n \rightarrow u.$

Demostración. Sea u_n un termino de $(u_n)_{n \in \mathbb{N}} \Rightarrow \exists q_n \in \mathbb{Q} : |u_n - q_n| < \frac{1}{n}$

Consideremos $(q_1, q_2, \dots) \subset \mathbb{Q}.$

Afirmo que $(q_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es de Cauchy. Dado $\varepsilon > 0$, como $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es de Cauchy $\Rightarrow \exists n_0 : \forall n, m > n_0, |u_n - u_m| < \frac{\varepsilon}{3}.$

Por arquimedianidad $\exists n_1 : \frac{1}{m}, \forall n > n_1 \Rightarrow$ si $n > \max(n_0, n_1) \Rightarrow$

$$|q_n - q_m| \leq |q_n - u_n| + |u_n - u_m| + |u_m - q_m| < \varepsilon \Rightarrow$$

$u = [(q_n)] \in \mathbb{R}$, falta ver que $u_n \rightarrow u.$

Si $\tilde{q}_n = [(q_n, q_n, \dots)] \in \mathbb{R} \Rightarrow \tilde{q}_n - u \rightarrow 0$ pues q_n es de Cauchy y por construcción

$$u_n - q_n < \frac{1}{n} \Rightarrow u_n - \tilde{q}_n \rightarrow 0 \text{ y como } \tilde{q}_n - u \rightarrow 0 \Rightarrow$$

$$u_n \rightarrow u. \quad \square$$

Lema 6.10. $l_n \rightarrow u$

Demostración. Según las posibles definiciones de l_n tenemos que:

$$u_{n+1} - l_{n+1} = m_n - l_n = \frac{u_n + l_n}{2} - l_n = \frac{u_n - l_n}{2} \text{ o}$$

$$u_{n+1} - l_{n+1} = u_{n+1} - m_n = u_n - \frac{u_n - l_n}{2} = \frac{u_n - l_n}{2} \Rightarrow$$

$$u_1 - l_1 = \frac{1}{2}(M - s)$$

$$u_2 - l_2 = \frac{1}{2}(u_1 - l_1) = \left(\frac{1}{2}\right)^2(u - s)$$

\vdots

$$u_n - l_n = \left(\frac{1}{2}\right)^n(M - s)$$

Por arquimedianidad de \mathbb{R} , $\forall \epsilon > 0$, $\frac{1}{2^n}(M - s) < \epsilon$, $\forall n > n_0 \Rightarrow$

$u_n - l_n \rightarrow 0 \therefore l_n \rightarrow u$, pues $u_n \rightarrow u$. □

Teorema 6.11. \mathbb{R} tiene la propiedad del supremo.

Demostración. 1) Veamos que u es cota superior, si no $u < s$, $s \in S \Rightarrow \epsilon = s - u > 0$, como $u_n \rightarrow u$ y es decreciente $\exists n : u_n - u < \epsilon \Rightarrow u_n < u + \epsilon = u + s - u = s$ Absurdo, por construcción u_n era cota superior de S , $\forall n$.

2) Veamos que es la menor de las cotas superiores.

Sabemos que l_n no es cota superior de S , así que $(\forall n \in \mathbb{N})(\exists s_n \in S) : l_n \leq s_n$. Como $l_n \rightarrow u$ y l_n es creciente \Rightarrow

$\forall \epsilon > 0$, $\exists n_0 : l_n > u - \epsilon$, $\forall n > n_0 \Rightarrow s_n \geq l_n > u - \epsilon$, $\forall n > n_0$. Es decir que para todo $\epsilon > 0$ tengo un s_n más grande en S $\therefore u$ es la menor de las cotas superiores. □

This page is intentionally left blank.

Clase VI - 10/09

7.1 Sucesiones

Una sucesión de números reales es una función $x : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$. Notamos $x(n) = x_n$ y lo llamamos el n -ésimo término de la sucesión. Indicamos la sucesión como $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ o (x_1, x_2, \dots) .

Una subsucesión de x es la restricción de x a un subconjunto infinito $A = \{n_1 < n_2 < \dots\} \subset \mathbb{N}$. Escribimos $(x_n)_{n \in A}$ para indicar la subsucesión.

Nota. Estrictamente la subsucesión no tiene dominio \mathbb{N} , pero es trivial considerarla como una función definida en \mathbb{N} componiendo con $1 \mapsto x_1, 2 \mapsto x_2, \dots$. Por esto se usa la notación $(x_{n_i})_{i \in \mathbb{N}}$.

Definición 7.1. Decimos que $a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \iff (\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N}) : |x_n - a| < \varepsilon, \forall n > n_0$.

Equivalentemente, si $\forall \varepsilon > 0$ el intervalo $(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ contiene a todos los términos de la sucesión salvo quizás un número finitos.

Teorema 7.2 (Unicidad del límite). Si $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ y $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = b \Rightarrow a = b$

Demostración. Supongamos que $a \neq b$. Tomemos $\varepsilon = \frac{|b - a|}{2} > 0$.

$(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \cap (b - \varepsilon, b + \varepsilon) = \emptyset$. En efecto si x pertenece a la intersección entonces $|x - a| < \varepsilon$ y $|x - b| < \varepsilon \Rightarrow$

$|b - a| \leq |a - x| + |x - b| < \varepsilon + \varepsilon = 2\varepsilon = |b - a|$ Absurdo! Como $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \Rightarrow \exists n_0 : x_n \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon), \forall n > n_0 \Rightarrow$

$x_n \notin (b - \varepsilon, b + \varepsilon), \forall n > n_0 \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \neq b$ pues vimos que son disjuntos. \square

Teorema 7.3. Si $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \Rightarrow$ toda subsucesión de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge a a .

Demostración. Dado $(x_{n_1}, x_{n_2}, \dots)$ una subsucesión de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Por hipótesis dado $\varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : |x_n - a| < \varepsilon, \forall n > n_0$. Como los índices de la subsucesión son infinitos, $\exists n_{i_0} > n_0 \Rightarrow$ si $n_i > n_{i_0} \Rightarrow |x_{n_i} - a| < \varepsilon, (n_i > n_{i_0} > n_0) \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n_i} = a$. \square

Teorema 7.4. Toda sucesión convergente es acotada.

Demostración. Sea $a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$. Tomando $\varepsilon = 1$, $\exists n_\varepsilon : x_n \in (a-1, a+1), \forall n > n_\varepsilon$.
 $A = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_\varepsilon}, a-1, a+1\}$, $c = \min(A)$, $d = \max(A) \Rightarrow x_n \in [c, d], \forall n \in \mathbb{N} \therefore$
la sucesión es acotada. \square

Teorema 7.5. Toda sucesión monótona y acotada es convergente.

Demostración. Supongamos que $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es creciente y acotada y quiero ver que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a = \sup\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$.

Dado $\varepsilon > 0$, como $a - \varepsilon < a$, $a - \varepsilon$ no puede ser cota superior de $\{x_n\} \Rightarrow \exists n_0 : x_{n_0} > a - \varepsilon$. Como $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es monótona, si $n > n_0 \Rightarrow x_n > x_{n_0} > a - \varepsilon \Rightarrow$
 $a - \varepsilon < x_n \leq a < a + \varepsilon, \forall n > n_0 \therefore x_n \rightarrow a$.

Análogamente para $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es decreciente y acotada. \square

Corolario 7.6. Si una sucesión monótona tiene una subsucesión convergente \Rightarrow es convergente.

Demostración. $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es acotada porque tiene una subsucesión acotada. \square

Ejemplo. $x_n = a^n, a \in \mathbb{R}$. Si $a = 0$ o $a = 1$ la sucesión es constante.

Si $a = -1$, la sucesión diverge porque $x_{2n} \rightarrow 1$ y $x_{2n+1} \rightarrow -1$.

Si $a > 1$, la sucesión es creciente y no acotada \Rightarrow diverge.

Si $a < -1$, la sucesión es decreciente y no acotada \Rightarrow diverge.

Si $0 < a < 1$, la sucesión es convergente por ser subsucesión de $\frac{1}{n}$ y más aún $a^n \rightarrow 0$.

Si $-1 < a < 0$, la sucesión converge pues $|a^n| = |a|^n = a^n \rightarrow 0$.

7.2 Propiedades de límites

Teorema 7.7. Si $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$ e $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ una sucesión acotada $\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \cdot y_n = 0$.

Demostración. $\exists c : |y_n| < c, \forall n \in \mathbb{N}$, pues y_n es acotado.

Dado $\varepsilon > 0$, como $x_n \rightarrow 0$, $\exists n_0 : |x_n| < \varepsilon/c, \forall n > n_0 \Rightarrow$

$|x_n y_n| < c(\varepsilon/c) = \varepsilon, \forall n > n_0 \therefore x_n \cdot y_n \rightarrow 0$. \square

Sea $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ y $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = b$.

Proposición 7.8. $x_n + y_n \rightarrow a + b$.

Demostración. Dado $\varepsilon > 0$, $\exists n_0 \in \mathbb{N} : |x_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}, \forall n > n_0$ y

$\exists n_1 \in \mathbb{N} : |y_n - b| < \frac{\varepsilon}{2}, \forall n > n_1$. Sea $n_2 = \max(n_0, n_1)$

Si $n > n_2$, $|(x_n + y_n) - (a + b)| \leq |x_n - a| + |y_n - b| \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$. □

Proposición 7.9. $x_n - y_n \rightarrow a - b$.

Demostración. Análogo. □

Proposición 7.10. $x_n \cdot y_n \rightarrow a \cdot b$.

Demostración. $x_n \cdot y_n - ab = x_n \cdot y_n - x_n \cdot b + x_n \cdot b - a \cdot b = x_n \cdot (y_n - b) + b \cdot (x_n - a)$.
Como $y_n - b \rightarrow 0$ y x_n es acotada, pues es convergente $\Rightarrow x_n \cdot (y_n - b) \rightarrow 0$. Además $x_n - a \rightarrow 0 \Rightarrow b(x_n - a) \rightarrow 0 \Rightarrow x_n \cdot y_n = a \cdot b$. □

Proposición 7.11. $\frac{x_n}{y_n} \rightarrow \frac{a}{b}$.

Demostración. Si $y_n \not\rightarrow 0 \Rightarrow y_n \neq 0$ salvo quizá finitos términos.

En efecto, como $b \neq 0$, si $\varepsilon = |b|$ resulta que $0 \notin (b - \varepsilon, b + \varepsilon) \Rightarrow$

$\exists n_\varepsilon : y_n \in (b - \varepsilon, b + \varepsilon), \forall n > n_\varepsilon$, luego $y_n \neq 0, \forall n > n_\varepsilon$.

Ahora escribo $\frac{x_n}{y_n} - \frac{a}{b} = \frac{x_n \cdot b - a \cdot y_n}{y_n \cdot b}$ quiero ver que $\frac{1}{y_n \cdot b}$ es acotada.

Como $y_n \cdot b \rightarrow b^2$ si $\varepsilon = \frac{b^2}{2}$, $\exists n_0 : y_n \cdot b > \frac{b^2}{2}, \forall n > n_0 \Rightarrow$

$0 < \frac{1}{y_n \cdot b} < \frac{2}{b^2}, \forall n > n_0 \Rightarrow (\frac{1}{y_n \cdot b})_{n \in \mathbb{N}}$ es acotada. □

7.3 Ejemplo subsucesiones

Ejemplo. $x_n = \sqrt[n]{a}$, $a > 0$.

$(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es monótona (decreciente si $a > 1$, creciente si $0 < a < 1$) y acotada $0 < l = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a}$.

Para ver que $l = 1$, considero la subsucesión $(a^{\frac{1}{n(n+1)}})_{n \in \mathbb{N}}$ convergente a l .

$l = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{\frac{1}{n(n+1)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} a^{\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} a^{\frac{1}{n}}}{\lim_{n \rightarrow \infty} a^{\frac{1}{n+1}}} = \frac{l}{l} = 1$.

$\therefore l = 1$.

Ejemplo. $x_n = \sqrt[n]{n}$.

Veamos si es monótona. $\sqrt[n]{n} > \sqrt[n+1]{n+1} \iff n^{n+1} > (n+1)^{n+1} \iff n > \left(\frac{n+1}{n}\right)^{n+1}$.

Esto pasa para $\forall n \geq 3$ porque $(1 + \frac{1}{n})^n < 3, \forall n \in \mathbb{N}$. Se puede demostrar por inducción. Luego, es decreciente a partir del tercer término.

Además está acotada inferiormente por 0, ($\sqrt[n]{n} > 0$) $\therefore \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = l = \inf\{\sqrt[n]{n}\}_{n \in \mathbb{N}}$.

Como $\sqrt[n]{n} > 1 \Rightarrow l \geq 1$ y $l \neq 0$.

Considero la subsucesión $(2n)^{\frac{1}{2n}} \Rightarrow l^2 = (\lim_{n \rightarrow \infty} (2n)^{\frac{1}{2n}})^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} 2^{\frac{1}{n}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} n^{\frac{1}{n}} = 1 \cdot l$.

Luego $l^2 = l$ y $l \neq 0 \therefore l = 1$.

Nota. La definición de límite puede ser reformulada de la siguiente forma:

Dado $a \in \mathbb{R}$ es el límite de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \iff \forall \varepsilon > 0$ el conjunto $\{n \in \mathbb{N} : x_n \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)\}$ tiene complemento finito (o vacío) en \mathbb{N} .

Vamos a ver que $a \in \mathbb{R}$ es el límite de alguna subsucesión de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \iff \forall \varepsilon > 0$ el conjunto $\{n \in \mathbb{N} : x_n \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)\}$ es subconjunto infinito de \mathbb{N}

Teorema 7.12. $a \in \mathbb{R}$ es el límite de alguna subsucesión de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \iff \forall \varepsilon > 0, \exists$ infinitos índices $n : x_n \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$.

Demostración. Para la ida tenemos que $a = \lim_{n \in A} x_n$, con $A = \{n_1 < n_2 < \dots\}$.

$\forall \varepsilon > 0, \exists i_0 : x_{n_i} \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon), \forall i > i_0$.

Como existen infinitos $i > i_0 : n_i \in A \Rightarrow \exists$ infinitos $n_i \in \mathbb{N}$ tales que $x_{n_i} \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$.

Recíprocamente si tomamos sucesivamente $\varepsilon = 1, 1/2, 1/3, \dots$. Puedo obtener $A = \{n_1, n_2, \dots\} : \lim_{n \in A} x_n = a$ pues:

Sea $n_1 \in \mathbb{N} : x_{n_1} \in (a - 1, a + 1)$. Supongamos por inducción que $n_1 < n_2 < \dots < n_i$ fueron definidos tales que $x_{n_2} \in (a - 1/2, a + 1/2), \dots, x_{n_i} \in (a - 1/i, a + 1/i)$.

Como el conjunto $\{n \in \mathbb{N} : x_n \in (a - \frac{1}{1+i}, a + \frac{1}{1+i})\}$ es infinito, contiene algún x_n con $n > n_i$ y lo tomo como $x_{n_{i+1}}$.

Como $|x_{n_i} - a| < \frac{1}{i}, \forall i \in \mathbb{N} \Rightarrow \lim_{i \rightarrow \infty} x_{n_i} = a$. □

7.4 Punto de acumulación

Definición 7.13. $a \in \mathbb{R}$ se llama punto de acumulación de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ si es límite de alguna subsucesión de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Definición 7.14. Sea $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ una sucesión acotada, digamos $\alpha \leq x_n \leq \beta, \forall n \in \mathbb{N}$. Si llamamos $X_n = \{x_n, x_{n+1}, \dots\}$ tenemos que $[\alpha, \beta] \supset X_1 \supset X_2 \supset \dots$.

Así que llamando $a_n = \inf(X_n)$, $b_n = \sup(X_n)$ tenemos que

$$\alpha \leq a_1 \leq a_2 \leq \cdots \leq a_n \leq \cdots \leq b_n \leq \cdots \leq b_2 \leq b_1 \leq \beta \Rightarrow.$$

$$\exists a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sup(a_n)_{n \in \mathbb{N}} = \sup(\inf(X_n)_{n \in \mathbb{N}}).$$

$$b = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \inf(b_n)_{n \in \mathbb{N}} = \inf(\sup(X_n)_{n \in \mathbb{N}}).$$

a se llama el límite inferior de la sucesión $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

$$a = \liminf_{n \rightarrow \infty} x_n.$$

b se llama el límite superior de la sucesión $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

$$b = \limsup_{n \rightarrow \infty} x_n.$$

Ejemplo. $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} = (-1, 2, -1/2, 3/2, -1/3, 4/3, \dots)$.

$$(x_{2n+1})_{n \in \mathbb{N}} = -\frac{1}{n} \text{ y } (x_{2n})_{n \in \mathbb{N}} = 1 + \frac{1}{n}.$$

$$\text{Luego } \inf(X_{2n-2}) = \inf(X_{2n-1}) = -\frac{1}{n}$$

$$\sup(X_{2n-2}) = \sup(X_{2n-1}) = 1 + \frac{1}{n} \Rightarrow \liminf_{n \rightarrow \infty} x_n = 0 \text{ y } \limsup_{n \rightarrow \infty} x_n = 1.$$

This page is intentionally left blank.

Clase VII - 13/09

8.1 Límite superior e inferior

Teorema 8.1. $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ acotada $\Rightarrow \liminf x_n$ es el menor punto de acumulación de la sucesión y $\limsup x_n$ es el mayor.

Demostración. Veamos que $a = \liminf_{n \rightarrow \infty} x_n$ es punto de acumulación de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Como $a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ (los ínfimos de X_n). Dados ε y $n_0 \in \mathbb{N}$, $\exists n_1 > n_0 : a - \varepsilon < a_{n_1} < a + \varepsilon$, $a_{n_1} = \inf(X_{n_1}) \Rightarrow a + \varepsilon$ no puede ser cota inferior de X_{n_1} .
 $\Rightarrow \exists n \geq n_1 : a_{n_1} \leq x_n \leq a + \varepsilon$, ($n \geq n_1 \geq n_0$ y $(a - \varepsilon < x_n < a + \varepsilon)$), luego a es punto de acumulación de $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$.
Falta ver que si $c < a \Rightarrow c$ no es punto de acumulación.
Como $a = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ y $c < a \Rightarrow \exists n_0 \in \mathbb{N} : c < a_{n_0} \leq a$. Como a_{n_0} es el ínfimo de X_{n_0} si $n \geq n_0 \Rightarrow c < a_{n_0} \leq x_n$. Tomando $\varepsilon = a_{n_0} - c \Rightarrow c + \varepsilon = a_{n_0}$ y entonces $\forall x_n : n \geq n_0, x_n \notin (c - \varepsilon, c + \varepsilon) \therefore c$ no es punto de acumulación. \square

Teorema 8.2. Toda sucesión acotada de \mathbb{R} tiene una subsucesión convergente.

Demostración. $\limsup x_n$ es punto de acumulación de x_n así que alguna subsucesión converge a él. \square

Corolario 8.3. Una sucesión acotada de \mathbb{R} es convergente $\iff \limsup x_n = \liminf x_n$, es decir, posee un único punto de acumulación.

Demostración. Para la ida tenemos que si $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge, toda subsucesión converge a lo mismo y en particular $\limsup x_n = \liminf x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.
Para la vuelta, si $\limsup x_n = \liminf x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n \Rightarrow$
Dado $\varepsilon > 0$, $\exists n_0 \in \mathbb{N} : a - \varepsilon \leq a_{n_0} \leq a \leq b_{n_0} \leq a + \varepsilon$.
Como $n \geq n_0 \Rightarrow a_{n_0} \leq x_n \leq b_{n_0}$. \square

8.2 Sucesiones de Cauchy

Dada una sucesión $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$, decimos que es de Cauchy si dado $\varepsilon > 0$, $\exists n_0 \in \mathbb{N} : |x_n - x_m| < \varepsilon$, $\forall n, m > n_0$. Al igual que hicimos con las sucesiones de Cauchy en \mathbb{Q} .

1. Toda sucesión convergente es de Cauchy
2. Toda sucesión de Cauchy es acotada

Lema 8.4. Si una sucesión de Cauchy tiene una subsucesión que converge a $a \in \mathbb{R} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$.

Demostración. Dado $\varepsilon > 0 : \exists n_0 : |x_n - x_m| < \varepsilon/2, \forall n, m > n_0$.

Como a es el límite de una subsucesión $\exists n_1 > n_0 : |x_{n_1} - a| < \varepsilon/2$.

\Rightarrow si $n > n_0, |x_n - a| \leq |x_n - x_{n_1}| + |x_{n_1} - a| < \varepsilon/2 + \varepsilon/2 = \varepsilon$. \square

Teorema 8.5. Toda sucesión de Cauchy en \mathbb{R} es convergente.

Demostración. Por ser de Cauchy es acotada, por ser acotada alguna subsucesión converge al \limsup o \liminf y por el lema anterior, toda la sucesión converge. \square

8.3 Límites infinitos

Definición 8.6. Decimos que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ si dado $a > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : x_n > a \forall n > n_0$.

Definición 8.7. Decimos que $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = -\infty$ si dado $a > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : x_n < -a \forall n > n_0$.

Proposición 8.8. $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ e $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es acotada inferiormente $\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + y_n) = +\infty$.

Demostración. Sea $A > 0, \exists c \in \mathbb{R} : c < y_n, \forall n \in \mathbb{N}$. Como $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty, \exists n_0 \in \mathbb{N} : x_n > A - c, \forall n > n_0 \Rightarrow$ Si $n > n_0, x_n + y_n > A - c + c = A \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + y_n) = +\infty$. \square

Proposición 8.9. $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ y $\exists c > 0 : y_n > c, \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} (x_n \cdot y_n) = +\infty$.

Demostración. Dado $A > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : x_n > A/c, \forall n > n_0 \Rightarrow$ si $n > n_0, x_n \cdot y_n > (A/c) \cdot c = A \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \cdot y_n = +\infty$. \square

Proposición 8.10. $x_n > 0 \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0 \iff \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n} = +\infty$.

Demostración. Para la ida, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$. Dado $A > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : 0 < x_n < 1/A, \forall n > n_0 \Rightarrow \frac{1}{x_n} > A, \forall n > n_0 \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n} = +\infty$.

Para la vuelta $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_n} = +\infty$. Dado $\varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : \frac{1}{x_n} > \frac{1}{\varepsilon}, \forall n > n_0 \Rightarrow 0 < x_n < \varepsilon, \forall n > n_0 \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$. \square

Proposición 8.11. Sean $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}, \forall n \in \mathbb{N}$ e $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ sucesiones de números positivos \Rightarrow

a) Si $\exists c > 0 : x_n > c, \forall n \in \mathbb{N}$ y si $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = 0 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{y_n} = +\infty$.

b) $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es acotada y $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = +\infty \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{y_n} = 0$.

Demostración. a) Dado $A > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : 0 < y_n < c/A, \forall n > n_0 \Rightarrow \frac{x_n}{y_n} > (A/c) \cdot c = A, \forall n > n_0 \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{y_n} = +\infty$.

b) Dado $\varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : y_n > k/\varepsilon, \forall n > n_0$, donde $k > 0$ es cota superior de $x_n \Rightarrow \forall n > n_0, 0 < \frac{x_n}{y_n} < k \cdot (\varepsilon/k) = \varepsilon \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{y_n} = 0$. \square

8.4 Series numéricas

Dada una sucesión $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ formamos una nueva sucesión $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Dada por $S_1 = a_1, S_2 = a_1 + a_2, \dots, S_n = a_1 + \dots + a_n$; que llamamos sumas parciales de la serie $\sum_{n \geq 1} a_n$.

Teorema 8.12. $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge $\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$.

Demostración. $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} S_{n-1} \Rightarrow 0 = s - s = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n - \lim_{n \rightarrow \infty} S_{n-1} = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n - S_{n-1} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n$. \square

Ejemplo. El recíproco del teorema anterior es falsa pues $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n}$ diverge.

Demostración.

$$S_{2^n} = 1 + 1/2 + (1/3 + 1/4) + (1/5 + 1/6 + 1/7 + 1/8) + \dots + \left(\frac{1}{2^{n-1} + 1} + \dots + \frac{1}{2^n} \right) \quad (8.1)$$

$$> 1 + 1/2 + 2/4 + 4/8 + \dots + \frac{2^{n-1}}{2^n} = 1 + n/2 \quad (8.2)$$

Luego $\lim_{n \rightarrow \infty} S_{2^n} = +\infty$. \square

Teorema 8.13. $a_n \geq 0, \forall n > 0 \Rightarrow$

$\sum_{n \geq 1} a_n$ converge $\iff S_n$ forman una sucesión acotada.

Demostración. Por ser $a_n \geq 0, (S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es monótona creciente, luego converge \iff es acotada. \square

Corolario 8.14 (Criterio de comparación). Sean $a_n, b_n \geq 0, \forall n \in \mathbb{N}$, dadas $\sum_{n \geq 1} a_n, \sum_{n \geq 1} b_n \Rightarrow$
Si $\exists c > 0, n_0 \in \mathbb{N} : a_n \leq c \cdot b_n, \forall n > n_0 \Rightarrow$

1. Si $\sum b_n$ converge entonces $\sum a_n$ converge.
2. Si $\sum a_n$ diverge entonces $\sum b_n$ diverge.

Nota. $\sum a_n$ converge \iff Dado $n_0 \in \mathbb{N}$, $\sum_{n \geq n_0} a_n$ converge.

Demostración. Sea $(s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ la primera serie, $(t_n)_{n \in \mathbb{N}}$ la segunda, $t_n = s_{n+n_0} - s_{n_0}$. \square

Teorema 8.15 (Criterio de Cauchy). $\sum a_n$ converge $\iff \forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : |a_{n+1} + \dots + a_{n+p}| < \varepsilon, \forall n > n_0, p \in \mathbb{N}$.

Demostración. $|s_{n+p} - s_n| = |a_{n+1} + \dots + a_{n+p}| < \varepsilon, \forall n > n_0 \in \mathbb{N} \Rightarrow (s_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es de Cauchy y por lo tanto convergente. \square

Definición 8.16. $\sum a_n$ es absolutamente convergente si $\sum |a_n|$ converge.

Si $\sum a_n$ converge y $\sum |a_n|$ diverge entonces decimos que es condicionalmente convergente.

Teorema 8.17. Toda serie absolutamente convergente es convergente.

Demostración. Como $\sum |a_n|$ converge $\Rightarrow \forall \varepsilon > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : |a_{n+1}| + \dots + |a_{n+p}| < \varepsilon, \forall n > n_0, p \in \mathbb{N} \Rightarrow$
 $|a_{n+1} + \dots + a_{n+p}| \leq |a_{n+1}| + \dots + |a_{n+p}| < \varepsilon, \forall n > n_0, p \in \mathbb{N} \therefore \sum a_n$ converge. \square

This page is intentionally left blank.

Clase VIII - 24/09

9.1 Ejemplo de convergencia condicional

Ejemplo. $\sum_{n \geq 1} \frac{(-1)^{n+1}}{n}$ converge, pero no lo hace absolutamente.

Demostración. i) Las sumas parciales pares son:

- $S_2 = 1 - 1/2$
- $S_4 = (1 - 1/2) + (1/3 - 1/4)$
- $S_6 = (1 - 1/2) + (1/3 - 1/4) + (1/5 - 1/6)$

En general $S_2 < S_4 < S_6 < \dots < S_{2n} < \dots < 1$, es creciente y acotada, luego converge.

ii) Las sumas parciales impares son:

- $S_1 = 1$
- $S_3 = 1 - (1/2 - 1/3)$
- $S_5 = 1 - (1/2 - 1/3) - (1/4 - 1/5)$

En general $S_1 > S_3 > \dots > S_{2n+1} > \dots > 0$. Es decreciente y acotada, luego converge.

Por i) e ii) $\exists \tilde{s} = \lim_{n \rightarrow \infty} S_{2n}$ y $\exists s' = \lim_{n \rightarrow \infty} S_{2n+1}$, como $S_{2n+1} - S_{2n} = \frac{1}{2n+1} \rightarrow 0 \Rightarrow \tilde{s} = s' \therefore$ la serie converge. \square

9.2 Corolarios de series

Corolario 9.1. Sea $\sum b_n$ una serie convergente de términos positivos si $\exists k > 0$ y $n_0 \in \mathbb{N}$ tales que $|a_n| \leq k \cdot b_n, \forall n > n_0 \Rightarrow \sum a_n$ converge absolutamente.

Demostración. Sencilla aplicación del criterio de comparación. \square

Corolario 9.2. $\forall n > n_0, |a_n| \leq k \cdot c^n$ con $0 < c < 1, k > 0 \Rightarrow \sum a_n$ es absolutamente convergente.

Demostración. Como $c \in (0, 1)$, $\sum c^n$ converge (serie geométrica). □

Nota. Tomando $k = 1$, $|a_n| \leq c^n \iff \sqrt[n]{|a_n|} \leq c < 1, \forall n > n_0 \in \mathbb{N}$. Que esto valga para algún n_0 específico significa que $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} < 1$.

9.3 Criterios de convergencia

9.3.1. Criterio de la raíz

Corolario 9.3. Si $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} < 1 \Rightarrow \sum a_n$ converge absolutamente.

Nota. Si existen infinitos índices tales que $\sqrt[n]{|a_n|} > 1 \Rightarrow \sum a_n$ diverge pues $a_n \not\rightarrow 0$. Si $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 1$ el criterio no concluye ($\sum \frac{1}{n}$, $\sum \frac{1}{n^2}$).

9.3.2. Criterio del cociente y D'Alembert

Teorema 9.4 (Criterio del cociente). Sean $\sum_{n \geq 1} a_n$ una serie tal que $a_n \neq 0, \forall n \in \mathbb{N}$ y $\sum_{n \geq 1} b_n$ una serie de términos positivos y convergente \Rightarrow

Si $\exists n_0 \in \mathbb{N} : \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} \leq \frac{|b_{n+1}|}{|b_n|}, \forall n > n_0 \Rightarrow \sum_{n \geq 1} a_n$ es absolutamente convergente.

Demostración.

$$\frac{|a_{n_0+2}|}{|a_{n_0+1}|} \leq \frac{|b_{n_0+2}|}{|b_{n_0+1}|}, \dots, \frac{|a_n|}{|a_{n-1}|} \leq \frac{|b_n|}{|b_{n-1}|}, \forall n > n_0 \quad (9.1)$$

Multiplicando todas las desigualdades obtenemos

$$\frac{|a_n|}{|a_{n_0+1}|} \leq \frac{|b_n|}{|b_{n_0+1}|} \iff |a_n| \leq \frac{|a_{n_0+1}| \cdot b_n}{b_{n_0+1}} \quad (9.2)$$

\therefore por criterio de comparación $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge. □

Corolario 9.5 (Criterio de D'Alembert). Si $\exists c \in (0, 1) : \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} \leq c, \forall n > n_0 \Rightarrow \sum_{n \geq 1} a_n$ converge absolutamente.

Equivalentemente si $\limsup \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} < 1 \Rightarrow \sum_{n \geq 1} a_n$ converge absolutamente.

Demostración. Tomamos $b_n = c^n$ en el teorema anterior pues $\sum_{n \geq 1} c^n$ converge si $c \in (0, 1)$. \square

Nota. Si el cociente es 1 el criterio no decide.
Si el cociente es mayor que 1 la serie diverge.

Teorema 9.6. $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ acotada $a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow$

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} \quad (9.3)$$

En particular si $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} \Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n}$ y son iguales.

Demostración. Veamos que $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n}$.

Supongamos que no lo es \Rightarrow

$$\exists c : \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} < c < \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \quad (9.4)$$

Por la primer desigualdad $\exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n > n_0, \frac{a_{n+1}}{a_n} < c \Rightarrow$

$$\frac{a_{n_0+1}}{a_{n_0}} < c, \frac{a_{n_0+2}}{a_{n_0+1}} < c, \dots, \frac{a_n}{a_{n+1}} < c \Rightarrow \quad (9.5)$$

Multiplicando termino a termino

$$\frac{a_n}{a_{n_0}} < c^{n-n_0} \Rightarrow a_n < \frac{a_{n_0}}{c^{n_0}} \cdot c^n \quad (9.6)$$

Llamemos $k = a_{n_0}/c^{n_0} \in \mathbb{R} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{k} = 1 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{k \cdot c^n} = c \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{k} = c$

Tendríamos que $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{k \cdot c^n} = c$ Absurdo!

Luego debe ser $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n}$.

\square

Ejemplo. Puede existir el límite de la raíz y no del cociente.

Demostración. Sean $0 < a < b$ y la sucesión $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ que se obtiene alternando cada término por a ó b .

$$x_1 = a, x_2 = a \cdot b, x_3 = a^2 \cdot b, x_4 = a^2 \cdot b^2.$$

$$\frac{x_{n+1}}{x_n} = \begin{cases} b & \text{si } n \text{ es par,} \\ a & \text{si no} \end{cases}$$

Luego $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}}{x_n}$, pero $\limsup_{n \rightarrow \infty} x_n = b$, $\liminf_{n \rightarrow \infty} x_n = a$.

Por otro lado $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{x_n} = \sqrt{a \cdot b}$. Si $x_{2k} = a^k \cdot b^k \Rightarrow \sqrt[2k]{a^k \cdot b^k} = \sqrt{a \cdot b}$.

Si $x_{2k-1} = a^k \cdot b^{k-1} \Rightarrow \sqrt[2k-1]{x_{2k-1}} = a^{\frac{k}{2k-1}} \cdot b^{\frac{k-1}{2k-1}} \rightarrow \sqrt{a \cdot b}$ si $k \rightarrow \infty$. \square

9.3.3. Criterio de Dirichlet - Abel

Teorema 9.7. Sea $\sum_{n \geq 1} a_n$ no necesariamente convergente cuyas sumas parciales forman una sucesión acotada.

Sea $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ una sucesión decreciente de números positivos con $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0 \Rightarrow \sum_{n \geq 1} a_n \cdot b_n$ es convergente.

Demostración.

$$a_1 \cdot b_1 + \cdots + a_n \cdot b_n = \quad (9.7)$$

$$a_1 \cdot (b_1 - b_2) + (a_1 + a_2) \cdot (b_2 - b_3) + \cdots + (a_1 + \cdots + a_{n-1}) \cdot (b_{n-1} - b_n) + (a_1 + \cdots + a_n) \cdot b_n \quad (9.8)$$

$$= S_1 \cdot (b_1 - b_2) + S_2 \cdot (b_2 - b_3) + S_3 \cdot (b_3 - b_2) + \cdots + S_{n-1} (b_{n-1} - b_n) + S_n \cdot b_n \quad (9.9)$$

$$= \sum_{i=2}^n S_{i-1} \cdot (b_{i-1} - b_i) + S_n \cdot b_n \quad (9.10)$$

Por hipótesis $\exists k > 0 : |S_n| \leq k, \forall n \in \mathbb{N}$ (son acotadas). Además $\sum_{n \geq 2} b_{n-1} \cdot b_n$ es una telescópica de números positivos.

Luego $\sum_{n \geq 2} S_{n-1} \cdot (b_{n-1} - b_n)$ es absolutamente converge y en particular convergente.

Como $S_n \cdot b_n \rightarrow 0 \Rightarrow \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i \geq 2}^n S_{i-1} \cdot (b_{i-1} - b_i) + S_n \cdot b_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i \geq 1}^n a_n \cdot b_n \therefore$ converge. \square

Corolario 9.8 (Abel). Si $\sum a_n$ es convergente y $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es decreciente de términos positivos $\Rightarrow \sum a_n \cdot b_n$ es convergente.

Demostración. $b_n \rightarrow c$ pues es acotada inferiormente por 0 y decreciente.

Sea $(b_n - c)_{n \in \mathbb{N}}$ es una sucesión decreciente que tiende a cero, podemos aplicar el teorema anterior y, luego $\sum_{n \geq 1} a_n \cdot (b_n - c) = S \Rightarrow \sum_{n \geq 1} a_n \cdot b_n = S - \sum a_n \cdot c$. \square

Corolario 9.9 (Criterio de Leibniz). Si $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ es decreciente y $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = 0 \Rightarrow \sum (-1)^n b_n$ converge.

Demostración. Aplicamos el criterio de Dirichlet pues $\sum (-1)^n$ no converge y $S_n = 0, -1$ son acotadas. \square

9.4 Parte positiva y negativa

Definición 9.10. Sea $\sum_{n \geq 1} a_n$, para cada $n \in \mathbb{N}$ definimos $p_n = \begin{cases} a_n & \text{si } a_n > 0, \\ 0 & \text{c.c} \end{cases}$
 $q_n = \begin{cases} 0 & \text{si } a_n \geq 0, \\ -a_n & \text{c.c} \end{cases} \Rightarrow p_n, q_n \geq 0, \forall n \in \mathbb{N}, a_n = p_n - q_n \text{ y } |a_n| = p_n + q_n = a_n + 2 \cdot q_n = 2 \cdot p_n - a_n.$

Nota. Si $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge absolutamente $\Rightarrow \forall k \in \mathbb{N}$ vale que:

$$\sum_{n \geq 1} |a_n| \geq \sum_{n=1}^k |a_n| = \sum_{n=1}^k p_n + \sum_{n=1}^k q_n \Rightarrow \quad (9.11)$$

$\sum_{n \geq 1} p_n$ y $\sum_{n \geq 1} q_n$ convergen, pues son crecientes y están acotadas por $\sum_{n \geq 1} |a_n|$.

Además si $\sum_{n \geq 1} p_n$ y $\sum_{n \geq 1} q_n$ convergen $\Rightarrow \sum a_n$ converge absolutamente.

Teorema 9.11. Si $\sum a_n$ converge condicionalmente $\Rightarrow \sum_{n \geq 1} p_n$ y $\sum_{n \geq 1} q_n$ son divergentes.

Demostración. Supongamos que $\sum q_n = c \Rightarrow |a_n| = a_n + 2 \cdot q_n$

$$\sum_{n=1}^k |a_n| = \sum_{n=1}^k a_n + 2 \cdot \sum_{n=1}^k q_n \quad (9.12)$$

Si $k \rightarrow +\infty$ luego $\sum_{n \geq 1} |a_n| = \sum_{n \geq 1} a_n + 2 \cdot c$ Absurdo! pues no converge absolutamente $\therefore \sum_{n \geq 1} q_n$ diverge. \square

9.5 Reordenamientos

Definición 9.12. Sea $\sum a_n$, cambiar el orden de la suma significa tomar una biyección $\phi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ y considerar la serie $\sum b_n$ como $b_n = a_{\phi(n)}$.

Teorema 9.13. Todas las reordenaciones de una serie absolutamente convergente convergen al mismo valor de la serie original.

Demostración. Sea $\sum a_n, a_n > 0 \forall n \in \mathbb{N}$. Sea $\phi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ una biyección y $b_n = a_{\phi(n)}$ quiero ver que $\sum b_n = \sum a_n$.

Sea S_n las sumas parciales de a_n y T_n las de b_n . Para cada $n \in \mathbb{N}$ llamo $m = \max(\phi(1), \dots, \phi(n))$. Donde $\{\phi(1), \dots, \phi(n)\} \subseteq [1, m]$.

Luego $T_n = \sum_{i \geq 1} a_{\phi(i)} \leq \sum_{j \geq 1} a_j = S_m$. Luego $T_n \leq S_m$.

Análogamente con $\phi^{-1} \Rightarrow S_m \leq T_n$ luego $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} T_n \therefore \sum_{n \geq 1} a_n = \sum_{n \geq 1} b_n$. \square

El caso general, $\sum_{n \geq 1} a_n = \sum_{n \geq 1} p_n - \sum_{n \geq 1} q_n \Rightarrow$ todo reordenamiento $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de los términos de $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ produce un reordenamiento de $(p_n)_{n \in \mathbb{N}}$ y $(q_n)_{n \in \mathbb{N}}$ que llamo $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$, $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$. De modo que son la parte positiva y negativa de $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ y usamos el caso anterior pues son términos de valores positivos.

This page is intentionally left blank.

Clase IX - 27/09

10.1 (Continuación) Reordenamientos

Teorema 10.1. Si $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge condicionalmente. Dado $c \in \mathbb{R}, \exists$ reordenamiento $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ de los términos de $\sum_{n \geq 1} a_n$ tal que $\sum_{n \geq 1} b_n = c$.

Demostración. Como a_n converge condicionalmente entonces $a_n \rightarrow 0 \Rightarrow p_n, q_n \rightarrow 0$, pero $\sum_{n \geq 1} p_n = \sum_{n \geq 1} q_n = +\infty$.

Reordenemos la serie tomando p_1, p_2, \dots, p_{n_1} donde n_1 es el menor índice tal que $p_1 + \dots + p_{n_1} > c, (T_1)$.

Similarmente $-q_1, -q_2, \dots, -q_{n_2}$ donde n_2 es el menor índice tales que $\sum_{i=1}^{n_1} p_i + \sum_{i=1}^{n_2} q_i < c, (T_2)$.

Seguimos con el menor n_3 tal que $\sum_{i=1}^{n_1} p_i + \sum_{i=1}^{n_2} q_i + \sum_{i=1}^{n_3} p_i > c, (T_3)$, etc.

Veamos que las sumas parciales T_n de este reordenamiento tienden a 0.

$\forall i$ impar tenemos que $T_{n_{i+1}} < c < T_i \Rightarrow$

$0 < T_{n_i} - c \leq p_{n_i} \Rightarrow 0 < c - T_{n_i} < q_{n_i}$ y como $\lim_{i \rightarrow \infty} p_{n_i} = 0 = \lim_{i \rightarrow \infty} q_{n_i} \Rightarrow \lim_{i \rightarrow \infty} T_{n_i} = c$.

Además para i impar si $n_i < n < n_{i+1} \Rightarrow T_{n_{i+1}} \leq T_n \leq T_{n_i}$ y para i par, si $n_i < n < n_{i+1} \Rightarrow T_{n_{i+1}} \leq T_n \leq T_{n_i}$

$\therefore \lim_{n \rightarrow \infty} T_n = c$. □

10.2 Topología Euclídea

Definición 10.2. La norma euclídea es la función $\|\cdot\|$ que en cada punto $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ toma el valor $\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$.

Propiedades:

1. $\forall x \in \mathbb{R}^n, \|x\| > 0$ y $\|x\| = 0 \iff x = 0$.
2. $\forall x \in \mathbb{R}^n, \forall \lambda \in \mathbb{R}, \|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$.
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$.

Proposición 10.3 (Desigualdad de Cauchy-Schwarz). Si $x = (x_1, \dots, x_n)$ e $y = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n \Rightarrow |\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i| \leq \|x\| \cdot \|y\|$.

Demostración. Ejercicio □

Definición 10.4. La distancia euclídea es la función $d : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} : d(x, y) = \|x - y\|$. Tenemos que $\forall x, y, z \in \mathbb{R}^n$.

1. $d(x, y) > 0$ y $d(x, y) = 0 \iff x = y$
2. $d(x, y) = d(y, x)$
3. $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$

Demostración. 1. $d(x, y) = \|x - y\| > 0, d(x, y) = 0 \iff \|x - y\| = 0 \iff x = y$.

2. $d(x, y) = \|x - y\| = \|(-1)\| \cdot \|y - x\| = \|y - x\| = d(y, x)$.

3. $d(x, z) = \|x - z\| = \|x - z + y - y\| \leq \|x - y\| + \|z - y\| = d(x, y) + d(y, z)$. \square

10.2.1. Conjuntos abiertos

Definición 10.5. Si $x \in \mathbb{R}^n$ y $r > 0$, la bola abierta centrada en x de radio r es el conjunto $B_r(x) = B(x, r) = \{y \in \mathbb{R}^n : d(x, y) < r\}$.

Definición 10.6. Un subconjunto $U \subset \mathbb{R}^n$ es abierto si $\forall x \in U, \exists r > 0 : B_r(x) \subset U$.

Lema 10.7. La bola abierta $B_r(x)$ es un conjunto abierto.

Demostración. Sea $s = r - d(x, y), y \in B_r(x)$. Si $z \in B_s(y) \Rightarrow$

$d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) < d(x, y) + s = r$

Luego $z \in B_r(x) \Rightarrow B_s(y) \subset B_r(x) \therefore$ es abierto. \square

Proposición 10.8. Un subconjunto propio $U \subset \mathbb{R}^n$ es abierto $\iff \forall x \in U$ se tiene que $\inf\{d(x, y) : y \in \mathbb{R}^n - U\} > 0$.

El ínfimo existe pues el conjunto es no vacío y acotado superiormente.

Demostración. Para la ida tenemos que si U es abierto entonces $\exists r > 0 : B_r(x) \subset U$.

Si $y \in \mathbb{R}^n - U \Rightarrow y \notin B_r(x)$ por lo que $d(x, y) > r > 0$ y r es una cota inferior mínima positiva del conjunto, pues si $d(x, y) < r \Rightarrow y \in B_r(x)$ absurdo!

Para la vuelta tomemos $s = \inf\{d(x, y) : y \in \mathbb{R}^n - U\} > 0$. Consideremos $B_{\frac{s}{2}}(x)$. Si z pertenece a esa bola entonces $d(x, z) < \frac{s}{2} < s \Rightarrow$

$d(x, z) \notin \{d(x, y) : y \in \mathbb{R}^n - U\}$ pues si no sería el ínfimo, se sigue que $z \in U$ y entonces $B_{\frac{s}{2}}(x) \subset U \therefore U$ es abierto. \square

Proposición 10.9. Propiedades de conjuntos abiertos:

1. \emptyset, \mathbb{R}^n son abiertos.
2. Intersección de una familia finita y no vacía de \mathbb{R}^n de subconjuntos abiertos es un conjunto abierto.
3. La unión de una familia cualquiera de subconjuntos abiertos de \mathbb{R}^n es abierto.

Demostración. 1. Por definición

2. $U = \bigcap_{i=1}^k U_i, U_i \subset \mathbb{R}^n$, abierto. Tomando $B_r(x)$ con $r = \min(r_1, \dots, r_k)$ y listo.
3. Si \mathcal{u} es una familia de abiertos de \mathbb{R}^n y U su unión, dado $x \in U$ tiene que haber algún $V \in \mathcal{u}$ tal que $x \in V$. Por ser V abierto $\exists r > 0 : B_r(x) \subset V \subset U \therefore U$ es abierto.

□

Notemos que la hipótesis de que la familia sea finita en la intersección es necesaria pues si definimos $U_n = (1 - \frac{1}{n}, 1 + \frac{1}{n}), \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \bigcap_{n \geq 1} U_n = \{1\}$ que no es abierto.

Definición 10.10. La topología Euclídea es el conjunto de todos los abiertos de \mathbb{R}^n .**Corolario 10.11.** Un subconjunto de \mathbb{R}^n es abierto \iff es la unión de una familia de bolas abiertas.**Demostración.** Para la ida: Sea $U \subset \mathbb{R}^n$ un conjunto abierto y sea \mathcal{u} la familia de bolas abiertas de \mathbb{R}^n contenidas en U . Si llamamos \tilde{U} a la unión de todas basta ver que $\tilde{U} = U$.

⊂) Inmediato.

⊃) Dado $x \in U, \exists r > 0 : B_r(x) \subset U$ por ser U abierto y $B_r(x) \in \mathcal{u} \Rightarrow B_r(x) \subset \tilde{U} \Rightarrow U \subset \tilde{U}$ pues vale $\forall x \in U$.

La vuelta es la proposición anterior.

□

10.2.2. Interior de un conjunto**Definición 10.12 (Interior).** $X \subset \mathbb{R}^n$ decimos que $x \in \mathbb{R}^n$ es interior a X si $\exists r > 0 : B_r(x) \subset X$. El interior del conjunto X , que notamos X° , es el conjunto de puntos interiores de X .**Nota.** Si $X^\circ \subset X, X$ es abierto $\iff X^\circ = X$.

Proposición 10.13. Sea $X \subset \mathbb{R}^n$. X° es abierto y coincide con la unión de todos los subconjuntos abiertos de X . En particular X° es el mayor abierto contenido en X .

Demostración. Sea \mathcal{U} la unión de todos los subconjuntos abiertos de X , veamos que $\mathcal{U} = X^\circ$.

i) Si $x \in X^\circ$, $\exists r > 0 : B_r(x) \subset \mathcal{U}$, como $B_r(x)$ es abierto $B_r(x) \subset \mathcal{U}$ por lo que $X^\circ \subset \mathcal{U}$.

ii) Si $x \in \mathcal{U} \Rightarrow \exists V \subset X$ abierto tal que $x \in V$, como V es abierto $\exists r > 0 : B_r(x) \subset V \subset X \Rightarrow X^\circ$ por definición de punto interior, luego $\mathcal{U} \subset X^\circ$.

$\therefore X^\circ = \mathcal{U}$. □

Corolario 10.14. Si $X \subset Y \Rightarrow X^\circ \subset Y^\circ$.

Demostración. $X^\circ \subset X \subset Y$. Como Y es el mayor abierto contenido en Y se sigue que $X^\circ \subset Y^\circ \subset Y$. □

Propiedades del interior

Proposición 10.15. $(X \cap Y)^\circ = X^\circ \cap Y^\circ$.

Demostración. $(X \cap Y)^\circ \subset X \cap Y \Rightarrow X^\circ \cap Y^\circ$ es abierto $\Rightarrow (X^\circ \cap Y^\circ) \subset (X \cap Y)^\circ$.

$X \cap Y \subset X \Rightarrow (X \cap Y)^\circ \subset X^\circ$ y $X \cap Y \subset Y \Rightarrow (X \cap Y)^\circ \subset Y^\circ \Rightarrow$

$(X \cap Y)^\circ \subset X^\circ \cap Y^\circ$. □

Proposición 10.16. $X^\circ \cup Y^\circ \subset (X \cup Y)^\circ$.

Demostración. $X^\circ \subset X \subset X \cup Y$ y $Y^\circ \subset Y \subset X \cup Y \Rightarrow$

$X^\circ \cup Y^\circ \subset (X \cup Y) \Rightarrow X^\circ \cup Y^\circ \subset (X \cup Y)^\circ$, pues $X^\circ \cup Y^\circ$ es abierto. □

Notemos que la inclusión puede ser estricta pues sea $X = (-1, 1)$, $Y = [1, 2] \Rightarrow 1 \notin X^\circ \cup Y^\circ = (-1, 1) \cup (1, 2)$, pero $1 \in (X \cup Y)^\circ = (-1, 2)$.

10.3 Entorno

Definición 10.17 (Entorno). Sea $x \in \mathbb{R}^n$ un entorno de x es un subconjunto $N \subset \mathbb{R}^n : x \in N^\circ$.

Proposición 10.18. Un subconjunto de \mathbb{R}^n es abierto \iff es un entorno de cada uno de sus puntos.

Demostración. Si \mathcal{U} es entorno de cada uno de sus puntos entonces $\mathcal{U} \subset \mathcal{U}^\circ \Rightarrow \mathcal{U} = \mathcal{U}^\circ$ \therefore es abierto. □

Proposición 10.19. El interior de un subconjunto $X \subset \mathbb{R}^n$ es el conjunto de puntos de los que X es entorno.

Demostración. Sea U el conjunto de puntos de X de los que X es un entorno. Si $x \in U \Rightarrow X$ es el entorno de x y $x \in X^\circ \Rightarrow U \subset X^\circ$. Si $x \in X^\circ \Rightarrow X$ es un entorno de $x \Rightarrow x \in U \Rightarrow X^\circ \subset U$. \square

10.4 Conjunto Cerrado

Definición 10.20 (Conjunto cerrado). Un subconjunto $F \subset \mathbb{R}^n$ se dice cerrado si su complemento es abierto ($\mathbb{R}^n - F$ es abierto).

Proposición 10.21. Propiedades de los conjuntos cerrados:

1. \emptyset, \mathbb{R}^n son cerrados.
2. La unión finita de conjuntos cerrados es cerrado.
3. La intersección de una familia arbitraria de cerrados es cerrada.

Demostración. 1. $(\mathbb{R}^n)^c = \emptyset$ y $\emptyset^c = \mathbb{R}^n$ abiertos.

2. Si $F_1, \dots, F_k \subset \mathbb{R}^n$ son cerrados $\Rightarrow (F_1 \cup \dots \cup F_k)^c = F_1^c \cap \dots \cap F_k^c$ y cada F_i es abierto.

3. Si F es una familia de cerrados $(\bigcap_{f \in F} f)^c = (\bigcup_{f \in F} f^c)$ que es abierto. \square

Definición 10.22. Si $x \in \mathbb{R}^n, r > 0$ llamamos bola cerrada centrada en x de radio r al conjunto $\overline{B_r x} = \overline{B(r, x)} = \{y \in \mathbb{R}^n : d(x, y) \leq r\}$.

Proposición 10.23. Veamos que la bola cerrada es, efectivamente, cerrada.

Demostración. Si $y \in \mathbb{R}^n - \overline{B_r(x)}$ tenemos que $d(x, y) > r$. Llamamos $0 < r_1 = d(x, y) - r$ y queremos que $B_{r_1}(y) \subset \mathbb{R}^n - \overline{B_r(x)}$.
Sea $z \in B_{r_1}(y)$ por desigualdad triangular:
 $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$
 $d(x, z) \geq d(x, y) - d(z, y) > d(x, y) - r_1 = r \Rightarrow z \notin \overline{B_r(x)} \therefore B_{r_1}(y) \subset \mathbb{R}^n - \overline{B_r(x)}$. \square

10.4.1. Clausura

Definición 10.24 (Clausura). La clausura de un subconjunto $X \subset \mathbb{R}^n$ es la intersección \bar{X} de todos los subconjuntos cerrados de \mathbb{R}^n que contienen a X .

Proposición 10.25. Sea $X \subset \mathbb{R}^n \Rightarrow \bar{X}$ es el menor subconjunto cerrado de \mathbb{R}^n que contiene a X en el sentido de que es contenido en todo subconjunto cerrado de \mathbb{R}^n que contiene a X .

Corolario 10.26. Un subconjunto $X \subset \mathbb{R}^n$ es cerrado $\iff \bar{X} = X$.

Demostración. Si X es cerrado, contiene a X y luego $\bar{X} \subset X$, como $X \subset \bar{X} \Rightarrow X = \bar{X}$. Si $X = \bar{X} \Rightarrow X$ es cerrado, pues \bar{X} es cerrado. \square

Proposición 10.27. $X \subset Y \Rightarrow \bar{X} \subset \bar{Y}$.

Demostración. $X \subset Y \subset \bar{X}$, pero como \bar{X} es el menor cerrado que contiene a $X \Rightarrow \bar{X} \subset \bar{Y}$. \square

Proposición 10.28. $\overline{X \cup Y} = \bar{X} \cup \bar{Y}$.

Demostración. $X \subset X \cup Y \Rightarrow \bar{X} \subset \overline{X \cup Y}$
 $Y \subset X \cup Y \Rightarrow \bar{Y} \subset \overline{X \cup Y} \Rightarrow$
 $\bar{X} \cup \bar{Y} \subset \overline{X \cup Y}$.

Para la otra contención notemos que $X \subset \bar{X}$ y $Y \subset \bar{Y} \Rightarrow X \cup Y \subset \bar{X} \cup \bar{Y} \Rightarrow \overline{X \cup Y} \subset \overline{\bar{X} \cup \bar{Y}} \subset \bar{X} \cup \bar{Y}$. \square

Proposición 10.29. $\overline{X \cap Y} \subset \bar{X} \cap \bar{Y}$.

Demostración. $X \cap Y \subset X \subset \bar{X}$ y $X \cap Y \subset Y \subset \bar{Y} \Rightarrow X \cap Y \subset \bar{X} \cap \bar{Y} \Rightarrow \overline{X \cap Y} \subset \overline{\bar{X} \cap \bar{Y}} \subset \bar{X} \cap \bar{Y}$.
 Pues es el menor de los cerrados. \square

This page is intentionally left blank.

Clase X - 01/10

11.1 (Continuación) Clausura

Proposición 11.1. Sean $X \subset \mathbb{R}^n$ y $x \in \mathbb{R}^n$. Son equivalentes:

1. $x \in \bar{X}$.
2. $\forall r > 0, B_r(x) \cap X \neq \emptyset$.
3. \forall entorno abierto N de X , $N \cap X \neq \emptyset$.
4. \forall entorno N de X , $N \cap X \neq \emptyset$.

Demostración. 4) \Rightarrow 3) \Rightarrow 2) son inmediatos.

2) \Rightarrow 1) Por contrarrecíproco, supongamos que $x \notin \bar{X}$ de manera tal que $\exists F$ cerrado tal que $x \in F$ y $X \subset F^c$ (si no estaría en la clausura) $\Rightarrow x \in F^c$ que es abierto $\Rightarrow \exists r > 0, B_r(x) \subset F^c, B_r(x) \cap X \subset B_r(x) \cap F = \emptyset$.

1) \Rightarrow 4) Supongamos que existe N entorno de X tal que $N \cap X = \emptyset$. El conjunto $U = N^c$ es abierto y $x \in U$. Además $U \subset N^c \subset X^c \Rightarrow X \subset U^c$ que es cerrado y $x \in U^c \Rightarrow x \in \bar{X}$. \square

Ejemplo. Si \mathbb{Q}^n es el conjunto de puntos de \mathbb{R}^n que tienen todas sus coordenadas racionales $\overline{\mathbb{Q}^n} = \mathbb{R}^n$. Decimos que \mathbb{Q}^n es denso en \mathbb{R}^n .

Demostración. 1) $\overline{\mathbb{Q}^n} \subseteq \mathbb{R}^n : \mathbb{Q}^n \subset \mathbb{R}^n$, que es cerrado $\Rightarrow \overline{\mathbb{Q}^n} \subseteq \mathbb{R}^n$.

2) $\mathbb{R}^n \subseteq \overline{\mathbb{Q}^n} : \text{Si } x \in \mathbb{R}^n \text{ y } U \text{ es entorno abierto de } x, U \cap \mathbb{Q}^n \neq \emptyset \text{ (1) } \iff 2)). \text{ Como } U \text{ es abierto } \exists r > 0 : B_r(x) \subset U.$

Si $x = (x_1, \dots, x_n)$ para cada $i \in \{1, \dots, n\}$ elijo un racional q_i en el intervalo $(x_i - \frac{r}{\sqrt{n}}, x_i + \frac{r}{\sqrt{n}}) : |x_i - q_i| < \frac{r}{\sqrt{n}} \Rightarrow d(x, q) < r$. Sabemos que existe porque ya probamos que \mathbb{Q} es denso en \mathbb{R} .

$\Rightarrow q \in B_r(x) \subset U \Rightarrow U \cap \mathbb{Q}^n \neq \emptyset$ pues al menos q está allí $\forall U$ entorno abierto de x .
 $\therefore \mathbb{R}^n \subset \overline{\mathbb{Q}^n}$. \square

11.2 Punto de acumulación

Definición 11.2 (Punto de acumulación). $X \subset \mathbb{R}^n$. Un punto $x \in X$ es de acumulación si pertenece a $\overline{X - \{x\}}$.

Definición 11.3 (Conjunto derivado). El conjunto derivado de X es el conjunto de todos los puntos de acumulación de X .

Proposición 11.4. Dados $X \subset \mathbb{R}^n, x \in X$, son equivalentes:

1. x es un punto de acumulación.
2. $\forall r > 0, B_r(x)$ contiene un punto de X distinto de x .
3. Todo entorno abierto de x contiene un punto de X distinto de x .
4. Todo entorno de x contiene un punto de X distinto de x .

Demostración. $4) \Rightarrow 3) \Rightarrow 2)$ son inmediatos.

$2) \Rightarrow 1)$ Por contrarrecíproco: $x \in X$ no es punto de acumulación de X luego $x \in (X - \{x\})^c$. Como ese conjunto es abierto $\exists r > 0, B_r(x) \subset (X - \{x\})^c \Rightarrow B_r(x) \cap (X - \{x\}) \subset B_r(x) \cap \overline{(X - \{x\})} = \emptyset$.

$1) \Rightarrow 4)$ Sea $x \in X'$ y N un entorno de x . Como $x \in \overline{X - \{x\}} \Rightarrow N \cap (X - \{x\}) \neq \emptyset$. \square

Proposición 11.5. Si $X \subset \mathbb{R}^n \Rightarrow \overline{X} = X \cup X'$.

Demostración. Sea $X \subset \mathbb{R}^n$ sabemos que $X \subset \overline{X}$. Por otro lado si $x \in X' \Rightarrow$ Para cualquier entorno N de X , $N \cap X \subset N \cap \overline{(X - \{x\})} \neq \emptyset \Rightarrow x \in \overline{X} \Rightarrow X' \subset \overline{X} \Rightarrow X \cup X' \subset \overline{X}$.

Sea $x \in \overline{X}$ y supongamos que $x \notin X$. Para cada entorno N de X tenemos que $N \cap (X - \{x\}) = N \cap X \neq \emptyset \Rightarrow x \in X'$, luego $\overline{X} \subset X \cup X'$.
 $\therefore \overline{X} = X \cup X'$. \square

Proposición 11.6. Sea $X \subset \mathbb{R}^n$. Un punto x es punto de acumulación de $X \iff \forall$ entorno abierto de X contiene infinitos elementos de x .

Demostración. \Leftarrow) Si todo entorno abierto de x contiene infinitos elementos de X entonces hay alguno distinto de x y $x \in X'$.

\Rightarrow) Sea $x \in X'$ y N un entorno abierto de $x \Rightarrow \exists r > 0 : B_r(x) \subset N$.

Construyamos una sucesión de puntos $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ pertenecientes a $N \cap X$ y tales que $d(x_n, x) > d(x_{n+1}, x) > 0, \forall n \in \mathbb{N}$.

$x_1 \neq x$, si $n > 0$ y ya elegimos $x_1, \dots, x_n : d(x_1, x) > \dots > 0, \forall i \in \{1, \dots, n-1\}$. Como $B_{d(x_n, x)}(x)$ es un entorno abierto de x y $x \in X'$ contiene algún punto distinto de x , lo llamo x_{n+1} .

Tenemos entonces que $d(x_n, x) > d(x_{n+1}, x) > 0 \Rightarrow$ los términos de la sucesión $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ son todos diferentes de x , distintos dos a dos y pertenecen a $B_r(x)$.

$\therefore (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset N \cap X$ es infinito. \square

Proposición 11.7. $X \subset \mathbb{R}^n, (X')' \subset X'$.

Demostración. $x \in (X')'$ y N un entorno abierto de x . Sabemos que N contiene un punto $y \in X'$ distinto de x . Luego contiene infinitos puntos de $X \therefore x \in X'$. \square

Corolario 11.8. El conjunto derivado de todo subconjunto de \mathbb{R}^n es cerrado.

Demostración. $\overline{X'} = X' \cup (X')' = X' \therefore$ es cerrado. \square

Definición 11.9 (Conjunto perfecto). $X \subset \mathbb{R}^n$ es un conjunto perfecto $\iff X = X'$.

Definición 11.10 (Punto aislado). $X \subset \mathbb{R}^n, x \in X$ es aislado en X si $\exists N$ un entorno de $x : N \cap X = \{x\}$.

Definición 11.11 (Conjunto discreto). Un conjunto es discreto \iff todos sus puntos son aislados.

Ejemplo. $\mathbb{Z} \subset \mathbb{R}$ es discreto.

11.3 Sucesiones en varias dimensiones

Decimos que una sucesión $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}^n$ converge a un punto $L \in \mathbb{R}^n$ si $(\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N}) : \forall n > n_0, d(x_n, L) < \varepsilon$.

Lema 11.12. Si una sucesión tiene límite en \mathbb{R}^n es único.

Demostración. Supongamos que converge a L y a L' con $L \neq L' \Rightarrow$

$$(\forall \varepsilon > 0)(\exists n_0 \in \mathbb{N}) : (\forall n > n_0), d(x_n, L) < \varepsilon$$

$$(\forall \varepsilon > 0)(\exists n_1 \in \mathbb{N}) : (\forall n > n_1), d(x_n, L') < \varepsilon$$

$$d(L, L') \leq d(L, x_n) + d(x_n, L') \leq 2 \cdot \varepsilon, \forall n > \max(n_0, n_1).$$

$$\text{Sea } \varepsilon = d(L, L')/2 \Rightarrow d(L, L') < d(L, L') \text{ Absurdo!}$$

□

Proposición 11.13. Sea $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}^n$ y $L \in \mathbb{R}^n$ son equivalentes:

1. $L = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$
2. $\forall r > 0, \exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n > n_0, x_n \in B_r(L)$
3. \forall entorno abierto N de $L, \exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n > n_0, x_n \in N$
4. \forall entorno N de $L, \exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n > n_0, x_n \in N$

Demostración. 4) \Rightarrow 3) \Rightarrow 2) \Rightarrow 1) son inmediatos de la definición de límite.

1) \Rightarrow 4) Sea N un entorno de L . Como $L \in N^\circ, \exists r > 0 : B_r(L) \subset N^\circ$ y como $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = L \Rightarrow \exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n > n_0, d(L, x_n) < r \Rightarrow$

$$x_n \in B_r(x), \forall n > n_0 \therefore x_n \in N, \forall n > n_0.$$

□

Proposición 11.14. Ejercicio: Demostrar las siguientes propiedades en \mathbb{R}^n .

1. Toda sucesión convergente es acotada.
2. Suma de sucesiones convergentes es convergente y el límite de la suma es la suma de los límites.
3. Si $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}^n$ y $(\lambda_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ convergen $\Rightarrow (x_n \cdot \lambda_n)_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_n$.

Proposición 11.15. Sea $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}^n, x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in \mathbb{R}^n$. Son equivalentes:

1. La sucesión converge en \mathbb{R}^n .
2. $\forall i \in \{1, \dots, n\}, (x_{ni})_{n \in \mathbb{N}}$ converge a \mathbb{R} .

Si se cumplen y además $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = L$ y $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{ni} = L_i, \forall i \in \{1, \dots, n\} \Rightarrow L = (L_1, \dots, L_n)$.

Demostración. 1) \Rightarrow 2) Sea $L = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ y $L = (L_1, \dots, L_n)$, si $i \in \{1, \dots, n\}$ y $\varepsilon > 0$, $\exists n_0 : \forall n > n_0, d(x_n, L) < \varepsilon \Rightarrow$
 $\forall n > n_0, d(x_{n_i}, L_i) < \varepsilon \therefore \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n_i} = L_i$.
 2) \Rightarrow 1) Si $\lim_{n \rightarrow \infty} x_{n_i} = L_i, \forall i \in \{1, \dots, m\}$. Llamo $L = (L_1, \dots, L_m)$.
 Dado $\varepsilon > 0, \exists n_i \in \mathbb{N} : \forall n > n_i, d(x_{n_i}, L_i) < \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}} \Rightarrow n_0 = \max(n_1, \dots, n_m)$ y $n > n_0$,
 $d(x_n, L) = (d(x_{n_1}, L_1)^2 + \dots + d(x_{n_m}, L_m)^2) < (\frac{\varepsilon^2}{n} + \dots + \frac{\varepsilon^2}{n})^{\frac{1}{2}} = \varepsilon$.
 $\therefore \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = L$. □

11.4 Conjuntos compactos

Teorema 11.16. Un subconjunto $F \subset \mathbb{R}^n$ es cerrado \iff si $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset F$ y $x_n \rightarrow x, x \in F$.

Demostración. \Rightarrow) Sea $F \subset \mathbb{R}^n$ cerrado y supongamos que $\exists (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset F, x_n \rightarrow L \in F^c$. Como F^c es abierto, entonces $\exists r > 0 : B_r(x) \subset F^c \Rightarrow \exists n_0 \in \mathbb{N} : x_n \subset F^c, \forall n > n_0$. Absurdo pues $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset F$.
 \Leftarrow) Si $F \subset \mathbb{R}^n$ no es cerrado $\exists x \in F'$ y $x \notin F$. Como x es punto de acumulación $\forall n > n_0 \in \mathbb{N}, B_{\frac{1}{n}}(x) \cap X \neq \emptyset$ y elijamos un punto x_n allí. $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset F$ y $d(x_n, x) < \frac{1}{n}, \forall n > n_0 \therefore x_n \rightarrow x \notin F$. □

Ejemplo. $(0, 1]$ no es cerrado pues $\frac{1}{n} \rightarrow 0$ y $\frac{1}{n} \in (0, 1], \forall n \in \mathbb{N}$.

Definición 11.17 (Relativamente compacto). Un subconjunto $F \subset \mathbb{R}^n$ se dice relativamente compacto si toda sucesión en F posee una subsucesión convergente.

Definición 11.18 (Compacto). Un conjunto se dice compacto si además de ser relativamente compacto cumple que está acotado.

Proposición 11.19. Un subconjunto de \mathbb{R}^n es relativamente compacto \iff es acotado.

Demostración. Sea $F \subset \mathbb{R}^n$ no acotado \Rightarrow para cada $n \in \mathbb{N}$, $\exists y_n \in F : \|y_n\| > n$.

Si $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ es una función estrictamente creciente cualquiera entonces la sucesión $(y_{f(n)})_{n \in \mathbb{N}}$ de $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ no es acotada, pues $\|y_{f(n)}\| > f(n) \geq n$ y \therefore no converge. Luego F no es relativamente compacto.

Supongamos ahora que F es acotado, digamos que $\exists k > 0 : F \subset B_k(0)$ y sea $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ una sucesión en F .

Para cada $m \in \mathbb{N}$, $x_m = (x_{m_1}, x_{m_2}, \dots, x_{m_n})$. Si $L = \{1, \dots, n\} \Rightarrow \forall m \in \mathbb{N}, \|x_{m_i}\| \leq \|x_m\| < k$, es decir que las sucesiones $(x_{m_1})_{m \in \mathbb{N}}, \dots, (x_{m_n})_{m \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ son acotadas.

En particular $\exists f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ estrictamente creciente tal que la subsucesión $(x_{f(m)_1})_{m \in \mathbb{N}}$ converge. Es decir que 1 es un elemento del conjunto D de todos los $f \in \{1, \dots, n\}$ con la propiedad: "Hay una función estrictamente creciente $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} : \forall i \in \{1, \dots, f\}$ la sucesión $(x_{f(m)_i})_{m \in \mathbb{N}}$ converge".

Sea $k = \max D$ y $k < n$. Como $k \in D$, $\exists f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ estrictamente creciente tal que $\forall i \in \{1, \dots, k\}$ la sucesión $(x_{f(m)_i})_{m \in \mathbb{N}}$ converge.

Por otro lado $(x_{f(m)_{k+1}})_{m \in \mathbb{N}}$ es acotada \Rightarrow Hay una función $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ estrictamente creciente tal que $(x_{g(f(m))_{k+1}})_{m \in \mathbb{N}}$ converge.

Entonces las $k+1$ sucesiones convergen y $g(f(m))$ generan subsucesiones que convergen a lo mismo.

Sea $h = g \circ f$ estrictamente creciente, entonces $k+1 \in D$ absurdo pues $k = \max D$. Luego $k = n \Rightarrow \exists f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ estrictamente creciente tal que

$(x_{f(m)_1})_{m \in \mathbb{N}}, \dots, (x_{f(m)_n})_{m \in \mathbb{N}}$ convergen $\therefore F$ es relativamente compacto. \square

This page is intentionally left blank.

Clase XI - 04/10

12.1 (Continuación) Conjuntos Compactos

Corolario 12.1. $F \subset \mathbb{R}^n$ es compacto \iff es cerrado y acotado.

Definición 12.2 (Cubrimiento). Sea $X \subset \mathbb{R}^n$. Una familia \mathcal{U} de subconjuntos de \mathbb{R}^n es un cubrimiento de X si $X \subset \bigcup_{u \in \mathcal{U}} u$ y es un cubrimiento abierto si todo subconjunto de \mathcal{U} es abierto.

Definición 12.3 (Subcubrimiento). Un subcubrimiento de \mathcal{U} es un cubrimiento \mathcal{V} de X tal que $\mathcal{V} \subset \mathcal{U}$.

Teorema 12.4 (Lindelöf). Todo cubrimiento abierto de algún subconjunto de \mathbb{R}^n admite a lo sumo un subcubrimiento a lo sumo numerable.

Demostración. Sea $X \subset \mathbb{R}^n$ y \mathcal{U} un cubrimiento abierto de X .

Si $X = \emptyset \Rightarrow \emptyset$ es un subcubrimiento de \mathcal{U} a lo sumo numerable.

Si $X \neq \emptyset \Rightarrow \mathcal{U} \neq \emptyset \Rightarrow$ Podemos fijar $U_0 \in \mathcal{U}$.

Para cada $q \in \mathbb{Q}^n$ y sea $s \in \mathbb{Q} > 0$. Elegimos un elemento $U(q, s)$ de \mathcal{U} de la siguiente forma:

1. Si hay elementos de \mathcal{U} que contienen a $B_s(q)$ elegimos cualquiera de ellos y lo llamamos $u(q, s)$.
2. Si no hay ninguno ponemos $U(q, s) = U_0$.

Sea $x \in X$ como \mathcal{U} es un cubrimiento abierto de X , $\exists u \in \mathcal{U}$ abierto tal que $x \in u \Rightarrow \exists r > 0 : B_r(x) \subset u$.

Si tomamos $q \in \mathbb{Q}^n : q \in B_{\frac{r}{2}}(x)$ y $s \in \mathbb{Q} : d(x, q) < s < \frac{r}{2} \Rightarrow x \in B_s(q)$ y $B_s(q) \subset B_r(x) \subset u$.

Así que hay elementos de \mathcal{U} que contienen a $B_s(q)$ y por lo tanto $x \in B_s(q) \subset U(q, s)$. Esto prueba que $\mathcal{V} = \{U(q, s) : q \in \mathbb{Q}^n, s \in \mathbb{Q} > 0\}$ es un subcubrimiento de \mathcal{U} y es numerable pues $\mathbb{Q}^n \times \mathbb{Q} > 0$ es numerable y la función $\mathbb{Q}^n \times \mathbb{Q} > 0 \rightarrow \mathcal{V}, (q, s) \mapsto U(q, s)$, es suryectiva $\therefore \mathcal{V}$ es a lo sumo numerable. \square

Corolario 12.5. Un subconjunto $F \subset \mathbb{R}^n$ es compacto $\iff \forall$ cubrimiento abierto de F admite un subcubrimiento finito.

Demostración. \Rightarrow) Sea $F \subset \mathbb{R}^n$ compacto y \mathcal{U} un cubrimiento abierto de F . Por el teorema anterior hay un subcubrimiento a lo sumo numerable \mathcal{V} de \mathcal{U} y $\exists f: \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{V}$ sobreyectiva.

Por el absurdo supongamos que \mathcal{U} no contiene subcubrimiento finito de F . En particular si $m \in \mathbb{N}$, $V_m = \{f(1), \dots, f(m)\} \in \mathcal{V}$ no es subcubrimiento de F , por ser finito $\Rightarrow \exists x_m \in F - \bigcup_{i=1}^m f(i)$.

De esta forma tenemos una sucesión de elementos de F , $(x_m)_{m \in \mathbb{N}}$. Como F es compacto $\exists h: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ estrictamente creciente tal que $(x_{h(m)})_{m \in \mathbb{N}} \rightarrow L \in F$.

Como \mathcal{V} es un cubrimiento de F y f es sobreyectiva $\Rightarrow \exists s \in \mathbb{N} : L \in f(s)$.

Por otro lado como $\lim_{n \rightarrow \infty} x_m = L$ y $f(s)$ es un entorno de L , $\exists m_0 \in \mathbb{N} : x_{h(m)} \in f(s), \forall m > m_0$.

Como $m < h(s + m_0) \Rightarrow x_{h(s+m_0)} \in f(s)$ Absurdo!

$x_{h(m_0+s)} \in F - \bigcup_{i=1}^{h(s+m_0)} f(i)$ que es disjunto con $f(s)$ pues $s < h(s + m_0)$.

$\therefore \mathcal{V}$ y, por lo tanto, \mathcal{U} contienen un subcubrimiento finito.

\Leftarrow) Supongamos ahora que todo cubrimiento abierto de F admite un subcubrimiento finito, pero que F no es compacto.

Hay una sucesión $(x_m)_{m \in \mathbb{N}} \subset F$ que no tiene ninguna subsucesión convergente. Si $x \in F$, no hay ninguna subsucesión de $(x_m)_{m \in \mathbb{N}}$ que converge a x y, por lo tanto, $\exists r_x > 0 : S_x = \{m \in \mathbb{N} : x_m \in B_{r_x}(x)\}$ es finito.

El conjunto $\mathcal{U} = \{B_{r_x}(x) : x \in F\}$ es un cubrimiento abierto de F .

Por hipótesis hay un subconjunto finito $\{y_1, \dots, y_k\}$ tal que $\{B_{r_{y_1}}(y_1), \dots, B_{r_{y_k}}(y_k)\}$ es subcubrimiento de F .

En particular $\forall m \in \mathbb{N}, \exists i \in \{1, \dots, k\} : x_m \in B_{r_{y_i}}(y_i) \Rightarrow$

$m \in S_{y_i} \therefore \mathbb{N} \subset S_{y_1} \cup \dots \cup S_{y_k}$ Absurdo! pues los S_{y_i} son finitos. □

Proposición 12.6. Sea $K \subset \mathbb{R}^n$ compacto. Si \mathcal{U} es un cubrimiento abierto de K entonces $\exists \delta > 0$: si $x, y \in K, d(x, y) < \delta \Rightarrow \exists u \in \mathcal{U}$ abierto tal que $x, y \in u$.
 δ se llama número de Lebesgue del cubrimiento \mathcal{U} .

Demostración. Sea \mathcal{U} un cubrimiento abierto de K . Para cada $x \in K, \exists U_x \in \mathcal{U} : x \in U_x$. Como U_x es abierto $\exists r_x > 0 : B_{r_x}(x) \subset U_x$.

El conjunto $\mathcal{U}' = \{B_{\frac{r_x}{2}} : x \in K\}$ es un cubrimiento abierto de K . \mathcal{U}' posee un subcubrimiento finito.

$\exists x_1, \dots, x_k : K \subset \bigcup_{i=1}^k B_{\frac{r_{x_i}}{2}}(x_i)$.

Veamos que $\delta = \frac{1}{2} \cdot \min(r_{x_1}, \dots, r_{x_k})$ es un número de Lebesgue:

Sean $x, y \in K : d(x, y) < \delta \Rightarrow$

$\exists i \in \{1, \dots, k\} : x \in B_{\frac{r_{x_i}}{2}}(x_i) \Rightarrow \|x_i - y\| \leq \|x_i - x\| + \|x - y\| \leq \frac{r_{x_i}}{2} + \delta < \frac{r_{x_i}}{2} + \frac{r_{x_i}}{2} = r_{x_i} \Rightarrow$

$x, y \in B_{r_{x_i}}(x_i) \subset U_{x_i}$ que es abierto de \mathcal{U} . □

12.2 Propiedades de límites

Definición 12.7 (Límite). $A \subset \mathbb{R}^n, x_0$ un punto de acumulación de A y $f : A \rightarrow \mathbb{R}^n$ una función, decimos que $y \in \mathbb{R}^n$ es límite de f en x_0 si:
 $(\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0) : (\forall x \in A) \text{ si } 0 < \|x - x_0\| < \delta \Rightarrow \|f(x) - y\| < \varepsilon.$

Lema 12.8. Si $A \subset \mathbb{R}^n$ y $x_0 \in A', f : A \rightarrow \mathbb{R}^k$ tiene como mucho un único límite en x_0 .

Demostración. Sea $y, y' \in \mathbb{R}^k$: son límite de f en $x_0 \in A'$. Tomemos $\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \|y - y'\| > 0$.

$$\Rightarrow \exists \delta_1, \delta_2 : 0 < \|x - x_0\| < \delta_1 \Rightarrow \|f(x) - y\| < \varepsilon$$

$$0 < \|x - x_0\| < \delta_2 \Rightarrow \|f(x) - y'\| < \varepsilon.$$

$$\text{Si } \delta = \min(\delta_1, \delta_2) \Rightarrow \text{Si } 0 < \|x - x_0\| < \delta \Rightarrow$$

$$\|f(x) - y\| + \|f(x) - y'\| < 2 \cdot \varepsilon$$

$$\|y - y'\| < 2 \cdot \varepsilon = \|y - y'\| \text{ Absurdo!}$$

\therefore el límite es único. □

Proposición 12.9. Sea $A \subset \mathbb{R}^n, x_0 \in A', f : A \rightarrow \mathbb{R}^k, y \in \mathbb{R}^k$ son equivalentes:

1. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y$
2. $(\forall \varepsilon > 0)(\exists \delta > 0) : f(B_\delta(x_0)) \cap (A - \{x_0\}) \subset B_\varepsilon(y)$
3. \forall entorno V de y , \exists un entorno U de x_0 tal que $f(U \cap (A - \{x_0\})) \subset V$.

Demostración. 1) \Rightarrow 2) Dado $\varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : \|x - x_0\| < \delta \Rightarrow \|f(x) - y\| < \varepsilon$

Si $x \in B_\delta(x_0) \cap (A - \{x_0\}) \Rightarrow x \in A$ y $\|x - x_0\| < \delta \Rightarrow$

$$\|f(x) - y\| < \varepsilon \Rightarrow f(x) \in B_\varepsilon(y) \therefore f(B_\delta(x_0)) \cap (A - \{x_0\}) \subset B_\varepsilon(y).$$

2) \Rightarrow 3) Si V es un entorno de $y \Rightarrow \exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(y) \subset V$. Por hipótesis $\exists \delta > 0 : f(B_\delta(x_0) \cap (A - \{x_0\})) \subset B_\varepsilon(y)$

Tomamos $U = B_\delta(x_0)$ que es un entorno de x_0 .

3) \Rightarrow 1) Sea $\varepsilon > 0$. Como $B_\varepsilon(y)$ es un entorno de y . Por hipótesis \exists un entorno U de $x_0 : f(U \cap (A - \{x_0\})) \subset B_\varepsilon(y)$. Como U es entorno de $x_0, \exists \delta > 0 : B_\delta(x_0) \subset U$.

Si $x \in A$ es tal que $0 < \|x - x_0\| < \delta \Rightarrow x \in B_\delta(x_0) \cap (A - \{x_0\}) \Rightarrow f(x) \in B_\varepsilon(y) \Rightarrow \|f(x) - y\| < \varepsilon$

$\therefore \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y$. □

Proposición 12.10. $A \subset \mathbb{R}^n, x_0 \in A', f : A \rightarrow \mathbb{R}^k, \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y \iff \forall (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset A - \{x_0\}, x_n \rightarrow x_0, (f(x_n))_{n \in \mathbb{N}}$ converge a y .

Demostración. \Rightarrow) Supongamos que $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y$. Sea $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset A - \{x_0\}$, $x_n \rightarrow x_0$.

Dado $\varepsilon > 0$, $\exists \delta > 0 : d(x, x_0) < \delta \Rightarrow d(f(x), y) < \varepsilon$. Además $\exists n_0 \in \mathbb{N} : d(x_n, x_0) < \delta, \forall n > n_0$.

$\Rightarrow d(f(x_n), y) < \varepsilon, \forall n > n_0 \therefore (f(x_n))_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow y$.

\Leftarrow) $\forall (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset A - \{x_0\}, x_n \rightarrow x_0, (f(x_n))_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow y$.

Supongamos que $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \neq y$. Luego $\exists \varepsilon > 0 : \forall \delta > 0, d(x, x_0) < \delta$, pero $d(f(x), y) \geq \varepsilon$.

En particular consideremos $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset A - \{x_0\}$ y podemos encontrar $d(x_n, x_0) < \delta, \forall n > n_0 \in \mathbb{N}$ pues $x_n \rightarrow x_0$.

Luego $d(f(x_n), y) \geq \varepsilon, \forall n > n_0 \therefore (f(x_n))_{n \in \mathbb{N}} \not\rightarrow y$. □

Proposición 12.11. Sea $A \subset \mathbb{R}^n, x_0 \in A', f, g : A \rightarrow \mathbb{R}^k, h : A \rightarrow \mathbb{R}$.

1. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y, \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = z \Rightarrow$
 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) + g(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) + \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = y + z$.
2. $\lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = r \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) \cdot f(x) = r \cdot y$
3. $\lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = r \neq 0, h(x) \neq 0 (\forall x \in A) \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{h(x)} = \frac{1}{\lim_{x \rightarrow x_0} h(x)} = \frac{1}{r}$.

Proposición 12.12. Sea $A \subset \mathbb{R}^n, x_0 \in A', f : A \rightarrow \mathbb{R}^k, \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y$.

1. Si $z \neq y, \exists r > 0 : z \in f(B_r(x_0) - (A - \{x_0\}))$.
2. Si $y > 0 \Rightarrow \exists r > 0 : f(x) > 0, \forall x \in (B_r(x_0) - (A - \{x_0\}))$.
3. $\exists r > 0 : f$ es acotada sobre $B_r(x_0) \cap A$, o sea, $\{f(x) : x \in B_r(x_0) \cap A\}$ está acotado superiormente.

Demostración. 1) $y \neq z \Rightarrow d(y, z) > 0 \Rightarrow \exists r > 0 : 0 < d(x, x_0) < r \Rightarrow d(f(x), y) < d(y, z)$.

Si $x \in B_r(x_0) \cap (A - \{x_0\}) \Rightarrow 0 < d(x, x_0) < r \Rightarrow d(f(x), y) < d(z, y)$.

$\therefore f(x) \neq z$, o sea, $z \in f(B_r(x_0) \cap (A - \{x_0\}))$.

2) Como $y > 0 \Rightarrow \frac{y}{2} > 0 \Rightarrow \exists r > 0 : \forall x \in X : 0 < d(x, x_0) < r \Rightarrow$

$d(f(x), y) < \varepsilon = \frac{y}{2}, f(x) > y - \frac{y}{2} > 0, \forall x \in B_r(x_0) \cap (A - \{x_0\})$.

3) Sea $\varepsilon = 1 \Rightarrow \exists r > 0 : \forall x \in A$ vale que $0 < d(x, x_0) < r \Rightarrow d(f(x), y) < 1 \Rightarrow$

Si $x \in B_r(x_0) \cap (A - \{x_0\}), \|f(x)\| = \|f(x) + y - y\| \leq \|f(x) - y\| + \|y\| < 1 + \|y\|$.

\therefore si $x_0 \notin A, 1 + \|y\|$ es cota superior para $\{f(x) : x \in B_r(x) \cap A\}$.

Si $x_0 \in A \Rightarrow 1 + \|y\| + \|f(x_0)\|$ es cota superior. La definición del límite no sirve para x_0 , por eso se separa en casos. \square

Teorema 12.13 (Teorema del Sandwich). Sea $A \subset \mathbb{R}^n, x_0 \in A'$ y $f, g, h : A \rightarrow \mathbb{R}, \forall x \in A, f(x) \leq g(x) \leq h(x)$, si:

$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = y \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = y$.

Demostración. Dado $\varepsilon > 0, \exists \delta_1, \delta_2 > 0 :$

$$0 < d(x, x_0) < \delta_1 \Rightarrow d(f(x), y) < \varepsilon \quad (12.1)$$

$$0 < d(x, x_0) < \delta_2 \Rightarrow d(h(x), y) < \varepsilon \quad (12.2)$$

Sea $\delta = \min(\delta_1, \delta_2) \Rightarrow \exists x \in A : 0 < d(x, x_0) < \delta \Rightarrow$

$$y - \varepsilon < f(x) \leq g(x) \leq h(x) < y + \varepsilon \Rightarrow d(g(x), y) < \varepsilon \quad (12.3)$$

\square

$\therefore \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = y$.

This page is intentionally left blank.

Clase XII - 08/10

13.1 Límites en varias dimensiones

13.2 Continuidad en un punto

13.3 Composición de funciones

13.4 Continuidad global

This page is intentionally left blank.

Clase XIII - 15/10

14.1 Gráficas continuas

14.2 Teorema de Weierstrass

14.3 Teorema del valor intermedio

14.4 Convexidad

This page is intentionally left blank.

Clase XIV - 18/10

15.1 Continuidad uniforme

15.2 Conjuntos Conexos y Arco-conexos

This page is intentionally left blank.

This page is intentionally left blank.

Bibliografía

- [1] Walter Rudin. *Principles of mathematical analysis, 3rd Edition*. McGraw-Hill, New York, 1976.
- [2] Elon Lages Lima. *Curso de Análise, Vol.1*. IMPA, Río de Janeiro, 2014.
- [3] Tom Mike Apostol. *Calculus*. John Wiley and Sons, New York, 1967.