



Universidad de Granada

DOBLE GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA Y  
MATEMÁTICAS

TOPOLOGÍA I

Autor:  
Jesús Muñoz Velasco

Curso 2024-2025



# Índice general

<b>1. Espacios Topológicos</b>	<b>5</b>
1.1. Topología métrica. La topología usual de $\mathbb{R}^n$	7
1.2. Comparación de Topologías	12
1.3. Cerrados	13
1.4. Bases de topología	15
1.5. Entornos	18
1.5.1. Bases de Entornos	20
1.6. Puntos adherentes. Clausura	22
1.7. Interior	25
1.8. Frontera	27
1.9. Topología inducida. Subespacio topológico	28
1.10. Axiomas de separación	30



# 1. Espacios Topológicos

**Definición 1.1.** Un **espacio topológico** es una par  $(X, \mathcal{T})$ , donde  $X \neq \emptyset$  es un conjunto y  $\mathcal{T} \subset \mathcal{P}(X)$  es una familia de subconjuntos de  $X$ . Esta familia  $\mathcal{T}$  tiene las siguientes propiedades:

(A1)  $\emptyset, X \in \mathcal{T}$ .

(A2) Si  $\{U_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{T}$ , entonces  $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}$  (unión arbitraria<sup>1</sup>).

(A3) Si  $U_1, U_2 \in \mathcal{T}$ , entonces  $U_1 \cap U_2 \in \mathcal{T}$ .

A la familia  $\mathcal{T}$  se le llama **topología** en el conjunto  $X$ . A los elementos de  $\mathcal{T}$  se les llama **abiertos** en el espacio topológico  $(X, \mathcal{T})$ . □

*Observación.* De (A3) podemos concretar que si  $U_1, \dots, U_k \in \mathcal{T}$ , entonces  $\bigcap_{i=1}^k U_i \in \mathcal{T}$ , es decir, que la intersección finita de abiertos es abierto (se prueba con una inducción trivial).

En general, si  $\{U_i\}_{i=1}^\infty \in \mathcal{T}$ , entonces  $\bigcup_{i=1}^\infty U_i$  no tiene por qué ser abierto. □

**Ejemplo.**

- ) **Topología trivial:** Sea  $X \neq \emptyset$ ,  $\mathcal{T}_t = \{\emptyset, X\} \Rightarrow (X, \mathcal{T}_t)$  es un e.t.<sup>2</sup>
- ) **Topología discreta:** Sea  $X \neq \emptyset$ ,  $\mathcal{T}_{disc} = \mathcal{T}_D = \mathcal{P}(X) \Rightarrow (X, \mathcal{T}_D)$  es un e.t.
- ) **Topología del punto incluido:** Sea  $X \neq \emptyset$ ,  $x_0 \in X$ ,  
 $\mathcal{T}_{x_0} = \{\emptyset\} \cup \{U \subset X : x_0 \in U\} \Rightarrow (X, \mathcal{T}_{x_0})$  es un e.t.
- ) **Topología cofinita:** (o topología de los complementos finitos) Sea  $X \neq \emptyset$ ,  
 $\mathcal{T}_{CF} = \{\emptyset\} \cup \{U \subset X : X \setminus U \text{ es finito}\} \Rightarrow (X, \mathcal{T}_{CF})$  es un e.t. (por las leyes de Morgan)

$$X \setminus \left( \bigcup_{i \in I} U_i \right) = \bigcap_{i \in I} (X \setminus U_i) \text{ (intersección de finitos es finito)}$$

$$X \setminus (U_1 \cap U_2) = (X \setminus U_1) \cup (X \setminus U_2) \text{ (unión de finitos es finito)}$$

---

<sup>1</sup>Puede ser finita o infinita, numerable o no numerable

<sup>2</sup>A partir de ahora notaremos así a un espacio topológico

- ) **Topología conumerable:** (o topología de los complementos numerables) Sea  $X \neq \emptyset$ ,  $\mathcal{T}_{CF} = \{\emptyset\} \cup \{U \subset X : X \setminus U \text{ es numerable}\} \Rightarrow (X, \mathcal{T}_{CF})$  es un e.t.
- )  $\mathbb{R}$ ,  $\mathcal{T} = \{\emptyset, \mathbb{R}, \mathbb{Q}, \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}\}$ ,  $\Rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{T})$  es un e.t.
- ) **Topología de Sierpinski:**  $X = \{a, b\}$ ,  $\mathcal{T} = \{\emptyset, \{a\}, X\} \Rightarrow (X, \mathcal{T})$  es un e.t.
- ) **Topología de Sorgenfrey:**  $X = \mathbb{R}$ ,  $\mathcal{T}_S$ ,  $U \in \mathcal{T}_S \iff \forall x \in U \exists \varepsilon > 0$  tal que  $[x, x + \varepsilon) \subset U$ . (es un caso particular del punto incluido,  $\mathcal{T}_a$ ).

□

*Observación.* En  $X = \{x\}$  solo existe una topología,  $\mathcal{T} = \{\emptyset, \{x\}\}$  (todas las topologías son la misma).

□

**Ejercicio 1.** Determinar todas las topologías en un conjunto con 2 elementos.

Consideramos  $X = \{a, b\}$ . Las topologías posibles son:

- ) Trivial:  $\mathcal{T}_t = \{\emptyset, X\}$
- ) Discreta:  $\mathcal{T}_{disc} = \mathcal{P}(X)$
- ) Punto incluido (a):  $\mathcal{T}_a = \{\emptyset, \{a\}, X\}$
- ) Punto incluido (b):  $\mathcal{T}_b = \{\emptyset, \{b\}, X\}$

Cualquier otra topología que se pueda construir sobre este conjunto coicidirá con alguna de las anteriores.

□

**Ejercicio 2.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  e.t. Demostrar que  $\mathcal{T} = \mathcal{T}_{disc} \iff \{x\} \in \mathcal{T} \ \forall x \in X$ .

$\Rightarrow$ ) Si  $\mathcal{T} = \mathcal{T}_{disc}$ , como  $\{x\} \in \mathcal{P}(X) \ \forall x \in X$ , se tiene que  $\{x\} \in \mathcal{T}_{disc} = \mathcal{T}$ .

$\Leftarrow$ ) Tenemos  $\{x\} \in \mathcal{T} \ \forall x \in X$ . Consideramos  $U \in \mathcal{P}(X)$  un subconjunto cualquiera de  $X$ . Podemos expresar  $U = \bigcup_{i \in I} \{x_i\}$ , donde  $\{x_i\} \in X \ \forall i \in I$ . Por la propiedad **(A2)** tenemos  $U \in \mathcal{T}$ . Como  $U$  era un subconjunto arbitrario de  $X$ , tenemos  $\mathcal{T} = \mathcal{T}_{disc}$ .

□

## 1.1. Topología métrica. La topología usual de $\mathbb{R}^n$

**Definición 1.2.** Un **espacio métrico** es un par  $(X, d)$  donde  $X \neq \emptyset$  es un conjunto y  $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$  es una aplicación que verifica:

- (D1)  $d(x, y) \geq 0 \quad \forall x, y \in X$ . Además,  $d(x, y) = 0 \iff x = y$ .  
 (D2) (simetría)  $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in X$ .  
 (D3) (desigualdad triangular)  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) \quad \forall x, y, z \in X$

A la aplicación  $d$  la llamaremos **distancia**.

□

**Ejercicio 1.1.1.** Demostrar que a partir de las propiedades (D2), (D3) y la segunda parte de (D1) se puede deducir la primera parte de (D1), y como consecuencia se tiene  $d : X \times X \rightarrow [0, \infty)$ .

Para cualesquiera  $x, y \in X$ , tenemos:

$$0 \stackrel{(D1)(2)}{=} d(x, x) \stackrel{(D3)}{\leq} d(x, y) + d(y, x) \stackrel{(D2)}{=} d(x, y) + d(x, y) = 2d(x, y)$$

De donde podemos deducir

$$d(x, y) \geq 0 \Rightarrow d : X \times X \rightarrow [0, \infty)$$

□

**Definición 1.3.**  $(X, d)$  e.m.<sup>3</sup>  $x \in X$ ,  $r > 0$ , se definen:

- La **bola (abierto)** de centro  $x$  y radio  $r$  como

$$B(x, r) = \{y \in X : d(x, y) < r\} \subset X$$

- La **bola cerrada** de centro  $x$  y radio  $r$  como

$$\overline{B}(x, r) = \{y \in X : d(x, y) \leq r\} \subset X$$

- La **esfera** de centro  $x$  y radio  $r$  como

$$S(x, r) = \{y \in X : d(x, y) = r\} \subset X$$

□

**Propiedades.** De las definiciones anteriores se deducen las siguientes propiedades:

- $\overline{B}(x, r) = B(x, r) \cup S(x, r)$
- $S(x, r) = \overline{B}(x, r) \setminus B(x, r)$

---

<sup>3</sup>A partir de ahora notaremos así a un espacio métrico

- ) Si  $s < r$ , entonces  $\overline{B}(x, s) \subset B(x, r)$

□

**Ejemplo.** (Espacio euclídeo  $\mathbb{R}^n$ ) En  $\mathbb{R}^n$  consideramos la **distancia usual**,

$$d(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Al espacio métrico  $(\mathbb{R}^n, d)$  lo denominaremos **Espacio Euclídeo**.

- ) Si  $n = 1$ ,  $d(x, y) = |x - y|$ ,

$$B(x, r) = (x - r, x + r)$$

$$\overline{B}(x, r) = [x - r, x + r]$$

$$S(x, r) = \{x - r, x + r\}$$

- ) En  $n = 2$  tenemos



$B(x, r) \equiv \text{disco}$



$\overline{B}(x, r) \equiv \text{disco cerrado}$



$S(x, r) \equiv \text{circunferencia}$

- ) En  $n = 3$  tenemos:



$B(x, r) \equiv \text{bola}$



$\overline{B}(x, r) \equiv \text{bola cerrada}$



$S(x, r) \equiv \text{esfera}$

□

**Ejemplo.** En un conjunto  $X \neq \emptyset$ , se define la **distancia discreta** como

$$d_{disc}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } x = y \\ 1 & \text{si } x \neq y \end{cases}$$



Con la distancia así definida tenemos:

$$B(x, y) = \begin{cases} X & \text{si } r > 1 \\ \{x\} & \text{si } r \leq 1 \end{cases}$$

$$\overline{B}(x, y) = \begin{cases} X & \text{si } r \geq 1 \\ \{x\} & \text{si } r < 1 \end{cases}$$

$$S(x, y) = \begin{cases} X \setminus \{x\} & \text{si } r = 1 \\ \emptyset & \text{si } r \neq 1 \end{cases}$$

□

**Ejemplo.**

- ) Si  $d$  es una distancia en  $X$  y  $\lambda > 0$ , entonces  $\lambda \cdot d : X \times X \rightarrow [0, \infty)$  también es una distancia y  $B_{\lambda d}(x, r) = B_d\left(x, \frac{r}{\lambda}\right)$ .
- ) Sean  $d$  y  $\tilde{d}$  distancias en  $X$  y  $d \leq \tilde{d}$ , entonces  $B_d(x, r) \supseteq B_{\tilde{d}}(x, r)$ .

□

**Definición 1.4.**  $(X, d)$  e.m. Un subconjunto  $U \subset X$  se dice **abierto métrico** si  $U = \emptyset$  o si  $\forall x \in U, \exists r > 0$  tal que  $B(x, r) \subset U$ .

□

**Proposición 1.1.** Si  $(X, d)$  es un espacio métrico, entonces

$$\mathcal{T}_d = \{U \subset X : U \text{ es un abierto métrico en } (X, d)\} \subset \mathcal{P}(X)$$

es una topología en  $X$  que llamamos la **topología métrica** en  $(X, d)$ .

*Demostración.* Veamos que  $\mathcal{T}_d$  así definida verifica las propiedades de una topología:

(A1)  $\emptyset, X \in \mathcal{T}_d$  trivialmente (ya que  $X \subset X$ ).

(A2) Sea  $\{U_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{T}_d$ . Tendremos que ver si se verifica que  $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}_d$ . Para ello estudiemos los dos casos posibles:

Si  $\bigcup_{i \in I} U_i = \emptyset \Rightarrow \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}_d$ .

Si  $\bigcup_{i \in I} U_i \neq \emptyset$ , entonces podemos considerar  $x \in \bigcup_{i \in I} U_i \Rightarrow \exists i \in I : x \in U_i \in \mathcal{T}_d \Rightarrow \exists r > 0 : B(x, r) \subset U_i \subset \bigcup_{i \in I} U_i \Rightarrow \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}_d$ .

(A3) Sean  $U_1, U_2 \in \mathcal{T}_d$ . ¿Se verifica que  $U_1 \cap U_2 \in \mathcal{T}_d$ ? De nuevo veamos los casos posibles:

Si  $U_1 \cap U_2 = \emptyset$ , entonces se verifica trivialmente.

Si  $U_1 \cap U_2 \neq \emptyset$ , entonces podemos considerar  $x \in U_1 \cap U_2 \Rightarrow \exists r_1, r_2 > 0 : B(x, r_1) \subset U_1$  y  $B(x, r_2) \subset U_2 \Rightarrow B(x, \min\{r_1, r_2\}) \subset U_1 \cap U_2$ , es decir existe una bola abierta en la intersección que contiene al punto luego  $U_1 \cap U_2 \in \mathcal{T}_d$ .

□

**Definición 1.5.** Se llama **topología usual de  $\mathbb{R}^n$** ,  $\mathcal{T}_u$ , a la topología métrica en  $\mathbb{R}^n$  con la distancia usual, es decir,  $U \subset \mathbb{R}^n$  es abierto en  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$  si  $U = \emptyset$  o si  $\forall x \in U \exists r > 0 : B(x, r) \subset U$ .

□

**Proposición 1.2.**  $(X, d)$  e.m. Se cumplen:

- (i) Las bolas abiertas en  $(X, d)$  son abiertos.
- (ii) Todo abierto no vacío en  $(X, d)$  se puede escribir como unión de bolas abiertas y como unión de bolas cerradas.

*Demostración.*

- (i) Sea  $x \in X$ ,  $r > 0$ , ¿ $B(x, r) \in \mathcal{T}_d$ ?

Sea  $y \in B(x, r) \Rightarrow d(x, y) < r \Rightarrow \exists \varepsilon > 0 : d(x, y) + \varepsilon < r \Rightarrow B(y, \varepsilon) \subset B(x, r)$ .  
Para ver esta última implicación tenemos que si tomamos un  $z \in B(y, \varepsilon) \Rightarrow d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) < d(x, y) + \varepsilon < r \Rightarrow z \in B(x, r)$ .



- (ii) Sea  $U \in \mathcal{T}_d \Rightarrow \forall x \in U \exists r_x > 0$  tal que  $B(x, r_x) \subset U \Rightarrow U = \bigcup_{x \in U} B(x, r_x) = \bigcup_{x \in U} \overline{B}\left(x, \frac{r_x}{2}\right)$ .

□

**Corolario 1.2.1.** En  $(X, d)$  tenemos

$$\mathcal{T}_d = \{\emptyset\} \cup \{U \subset X : U \text{ es unión de bolas abiertas}\}$$

□

**Ejemplo.**

- $(X, d)$  e.m. En general, no todo abierto es una bola. Por ejemplo la unión de bolas no concéntricas.
- No todo conjunto en  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$  es abierto. Por ejemplo  $\{x\} \subset \mathbb{R}^n$  no es abierto.
- En  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$  los únicos intervalos abiertos (topológicamente) son los intervalos abiertos, es decir, los del tipo  $\mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$ ,  $(a, b)$  con  $a < b$ ,  $(-\infty, a)$  y  $(b, +\infty)$ .

- ) En  $(X, d)$ , en general la intersección infinita de abiertos no es abierto. Por ejemplo,  $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \left(\frac{-1}{n}, \frac{1}{n}\right) = \{0\}$  que no es abierto.
- )  $X \neq \emptyset$ ,  $\mathcal{T}_{d_{disc}} = \mathcal{T}_{disc}$  (la topología asociada a la distancia discreta es la distancia discreta).

□

**Definición 1.6.** Sean  $X \neq \emptyset$  y  $d_1, d_2$  distancias en  $X$ . Decimos que  $d_1$  y  $d_2$  son **equivalentes** si existen  $a, b > 0$  tal que

$$a \cdot d_1(x, y) \leq d_2(x, y) \leq b \cdot d_1(x, y) \quad \forall x, y \in X$$

□

**Proposición 1.3.** Si  $d_1, d_2$  son distancias en  $X \neq \emptyset$  y existe  $a > 0$  tal que  $a \cdot d_1(x, y) \leq d_2(x, y) \quad \forall x, y \in X$ , entonces  $\mathcal{T}_{d_1} \subset \mathcal{T}_{d_2}$ . En particular, si  $d_1$  y  $d_2$  son equivalentes, entonces  $\mathcal{T}_{d_1} = \mathcal{T}_{d_2}$ .

*Demostración.* Sea  $U \in \mathcal{T}_{d_1}$ ,  $U \neq \emptyset$ , ¿ $U \in \mathcal{T}_{d_2}$ ?

Sea  $x \in U \in \mathcal{T}_{d_1} \Rightarrow \exists r > 0 : B_{d_1}(x, r) \subset U$ . Como  $a \cdot d_1 \leq d_2 \Rightarrow B_{d_2}(x, a \cdot r) \subset B_{d_1}(x, r)$ . Para verlo, tomamos  $y \in B_{d_2}(x, a \cdot r) \Rightarrow d_2(x, y) < a \cdot r \Rightarrow a \cdot d_1(x, y) < r \Rightarrow y \in B_{d_1}(x, r)$ . Por tanto,  $B_{d_2}(x, a \cdot r) \subset U \Rightarrow U \in \mathcal{T}_{d_2} \Rightarrow \mathcal{T}_{d_1} \subset \mathcal{T}_{d_2}$ .

□

**Definición 1.7.** Un e.t.  $(X, \mathcal{T})$  se dice **metrizable** si existe una distancia  $d$  en  $X$  tal que  $\mathcal{T} = \mathcal{T}_d$ .

□

**Ejemplo.**

- )  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$  es metrizable.
- )  $(X, \mathcal{T}_{disc})$  es metrizable.

□

**Ejercicio 1.1.2.** Si  $(X, \mathcal{T})$  es un e.t. metrizable, entonces cumple la condición de Hausdorff:

$$\forall x, y \in X, x \neq y, \quad \exists U, V \in \mathcal{T} \text{ tal que } x \in U, y \in V \text{ y } U \cap V = \emptyset$$

Por ser metrizable, sabemos que  $\mathcal{T} = \mathcal{T}_d$  donde  $d : X \rightarrow [0, \infty)$  es una distancia. Por tanto, para cada  $x, y \in X$  con  $x \neq y$  tengo  $d(x, y) > 0$ . Puedo considerar entonces  $r = \frac{d(x, y)}{2}$ . Tengo entonces  $U = B(x, r)$  y  $V = B(y, r)$ . Es claro que  $x \in U$  y  $y \in V$ . Veamos que  $U$  y  $V$  son disjuntos. Tengo  $U \cap V = \{z \in X : d(z, x) < r, d(z, y) < r\}$ . Supongamos que este conjunto no es vacío, en cuyo caso tendría que  $\exists z \in X$  tal que  $d(z, x) < r$  y  $d(z, y) < r$ . Por tanto,  $d(z, x) + d(z, y) < 2r = d(x, y)$  lo cual incumple la desigualdad triangular. Llegamos a contradicción y por tanto  $U \cap V = \emptyset$ .

□

**Ejemplo.**

- $(X, \mathcal{T}_t)$  no es metrizable si  $\#X > 2$  (cardinal del conjunto) ya que no verifica la condición de Hausdorff.
- $(X, \mathcal{T}_{x_0})$  no es metrizable por la misma razón (ya que la intersección de cualesquiera dos abiertos va a contener a  $x_0$ ).
- $(X, \mathcal{T}_{CF})$  no es metrizable si  $X$  es infinito (aplicar las leyes de Morgan para la intersección).
- $(X, \mathcal{T}_{CN})$  no es metrizable si  $X$  no es numerable.
- $(\mathbb{R}, \{\emptyset, \mathbb{R}, \mathbb{Q}, \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}\})$ .
- La topología de Sierpinski tampoco es metrizable (ya que el único abierto que contiene a  $b$  es el total).
- La topología de Sorgenfrey  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_S)$  cumple la propiedad de Hausdorff.

□

**1.2. Comparación de Topologías**

**Definición 1.8.** Sean  $X \neq \emptyset$  un conjunto y  $\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2$  dos topologías en  $X$ . Diremos que  $\mathcal{T}_2$  es **más fina** que  $\mathcal{T}_1$  o que  $\mathcal{T}_1$  es **menos fina** que  $\mathcal{T}_2$  si  $\mathcal{T}_1 \subseteq \mathcal{T}_2$  y lo notamos como  $\mathcal{T}_1 \leq \mathcal{T}_2$ .

□

**Ejemplo.**

- $X \neq \emptyset, \mathcal{T}_{CF} \leq \mathcal{T}_{CN}$ .
- $(X, \mathcal{T})$  e.t, entonces  $\mathcal{T}_t \leq \mathcal{T} \leq \mathcal{T}_{disc}$
- Si  $\mathcal{T}_1 \leq \mathcal{T}_2$  y  $\mathcal{T}_2 \leq \mathcal{T}_1$ , entonces  $\mathcal{T}_1 = \mathcal{T}_2$  (por doble inclusión).
- En general si tenemos dos topologías en  $X$ , no siempre son comparables. Por ejemplo la topología del punto incluida en dos puntos distintos:

$$0, 1 \in \mathbb{R} \quad (\mathbb{R}, \mathcal{T}_0), (\mathbb{R}, \mathcal{T}_1)$$

Veamos que  $\mathcal{T}_0 \not\leq \mathcal{T}_1$ , ya que  $\{0\} \notin \mathcal{T}_1$ , y por el mismo motivo (pero con el 1) tenemos  $\mathcal{T}_1 \not\leq \mathcal{T}_0$ .

Otro ejemplo sería  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u), (\mathbb{R}, \mathcal{T}_{x_0})$  ya que  $\{x_0\} \in \mathcal{T}_{x_0}, \{x_0\} \notin \mathcal{T}_u \Rightarrow \mathcal{T}_{x_0} \not\leq \mathcal{T}_u$ . Igualmente  $(x_0 + 1, x_0 + 2) \in \mathcal{T}_u$  y  $(x_0 + 1, x_0 + 2) \in \mathcal{T}_{x_0} \Rightarrow \mathcal{T}_u \not\leq \mathcal{T}_{x_0}$ .

- En  $\mathbb{R}, \mathcal{T}_u \leq \mathcal{T}_{Sorgenfrey}$ .
- $(X, d), (X, d'), d \leq d' \Rightarrow \mathcal{T}_d \leq \mathcal{T}_{d'}$ .

□

### 1.3. Cerrados

**Definición 1.9.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t. Diremos que un conjunto  $F \subset X$  es **cerrado** en  $(X, \mathcal{T})$  si  $X \setminus F \in \mathcal{T}$ . Denotamos por  $\mathcal{C}_{\mathcal{T}}$  a la familia de todos los cerrados en  $(X, \mathcal{T})$ . □

**Propiedades.**

(C1)  $\emptyset, X \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ .

(C2) Si  $\{F_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ , entonces  $\bigcap_{i \in I} F_i \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ .

(C3) Si  $F_1, F_2 \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ , entonces  $F_1 \cup F_2 \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ .

Por inducción, de (C3) tenemos que la unión finita de cerrados es cerrada.

*Observación.*

- )  $U \in \mathcal{T} \iff X \setminus U \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}, F \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \iff X \setminus F \in \mathcal{T}$ .
- )  $\mathcal{T}_1 \leq \mathcal{T}_2 \iff \mathcal{C}_{\mathcal{T}_1} \supseteq \mathcal{C}_{\mathcal{T}_2}$ . Esto además implica que  $\mathcal{T}_1 = \mathcal{T}_2 \iff \mathcal{C}_{\mathcal{T}_1} = \mathcal{C}_{\mathcal{T}_2}$ . Esto nos dice que para conocer una topología basta con conocer la familia de sus cerrados.
- ) En general, puede haber conjuntos que no sean ni abiertos ni cerrados. Por ejemplo, en  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ , tenemos que  $[0, 1) \notin \mathcal{T}_u \cup \mathcal{C}_{\mathcal{T}_u}$ .
- ) En  $(X, \mathcal{T}_{x_0})$  tenemos que  $\mathcal{T}_{x_0} \cup \mathcal{C}_{\mathcal{T}_{x_0}} = \mathcal{P}(X)$  y además  $\mathcal{T}_{x_0} \cap \mathcal{C}_{\mathcal{T}_{x_0}} = \{\emptyset, X\}$ .
- ) En general, la unión arbitraria de cerrados no es cerrado. Por ejemplo,  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ , tomamos  $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} [-\frac{1}{n}, 3 - \frac{1}{n}] = (0, 3)$ . Otro ejemplo sería  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_{CF})$  considerando  $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{n\} = \mathbb{N}$  que no es cerrado. □

**Ejemplo.**

- ) Topología trivial:  $\mathcal{T}_t = \{\emptyset, X\} \Rightarrow \mathcal{C}_{\mathcal{T}_t} = \mathcal{C}_t = \{\emptyset, X\}$ .
- ) Topología discreta:  $\mathcal{T}_{disc} = \mathcal{P}(X) \Rightarrow \mathcal{C}_{\mathcal{T}_{disc}} = \mathcal{C}_{disc} = \mathcal{P}(X)$ .
- ) Topología del punto incluido:  $x_0 \in X, \mathcal{T}_{x_0} = \{\emptyset\} \cup \{U \subset X : x_0 \in U\} \Rightarrow \mathcal{C}_{\mathcal{T}_{x_0}} = \mathcal{C}_{x_0} = \{X\} \cup \{F \subset X : x_0 \notin F\}$ .
- ) Topología cofinita:  $\mathcal{T}_{CF} = \{\emptyset\} \cup \{U \subset X : X \setminus U \text{ finito}\} \Rightarrow \mathcal{C}_{\mathcal{T}_{CF}} = \mathcal{C}_{CF} = \{X\} \cup \{F \subset X : F \text{ finito}\}$ .
- ) En ocasiones no es fácil describir  $\mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ . Por ejemplo en  $\mathcal{T}_u$  o  $\mathcal{T}_{Sorgenfrey}$ . □

**Ejemplo.** En un espacio métrico  $(X, \mathcal{T}_d)$ , las bolas cerradas y las esferas son cerrados.

*Demostración.*

- ) Sea  $x \in X$ ,  $r > 0$ , ¿ $\overline{B}(x, r) \in \mathcal{C}_d$ ? Esto es equivalente a preguntarse ¿ $X \setminus \overline{B}(x, r) \in \mathcal{T}_d$ ?

Sea  $y \in X \setminus \overline{B}(x, r) \Rightarrow d(x, y) > r$ . Entonces  $\exists \varepsilon > 0 : r + \varepsilon < d(x, y) \Rightarrow B(y, \varepsilon) \cap \overline{B}(x, r) = \emptyset \Rightarrow B(y, \varepsilon) \subset X \setminus \overline{B}(x, r) \in \mathcal{T}_d \Rightarrow X \setminus \overline{B}(x, r) \in \mathcal{C}_\mathcal{T}$

- ) Sea  $x \in X$ ,  $r > 0$ , ¿ $S(x, r) \in \mathcal{C}_d$ ? Dado que  $X \setminus S(x, r) = B(x, r) \cup (X \setminus \overline{B}(x, r)) \in \mathcal{T}_d$  (por ser unión de abiertos).

□

**Ejercicio 1.3.1.** En  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$  los únicos intervalos cerrados son los de la forma  $(-\infty, a]$ ,  $[b, +\infty)$ ,  $\mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$  y  $[a, b]$  con  $a < b$ .

Sabemos que los únicos abiertos en  $\mathcal{T}_u$  son los intervalos de la forma  $\mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$ ,  $(a, b)$  con  $a < b$ ,  $(-\infty, a)$  y  $(b, +\infty)$ .

Es claro que  $\mathbb{R} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}_u}$ .

Tenemos que  $\mathbb{R} \setminus (-\infty, a] = (a, +\infty) \in \mathcal{T}_u$ , luego  $(-\infty, a] \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}_u}$ .

De la misma forma,  $\mathbb{R} \setminus [b, +\infty) = (-\infty, b) \in \mathcal{T}_u$ , luego  $[b, +\infty) \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}_u}$ .

Finalmente  $\mathbb{R} \setminus [a, b] = (-\infty, a) \cup (b, +\infty) \in \mathcal{T}_u$  por ser unión de abiertos luego  $[a, b] \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}_u}$ .

Dado que ya han aparecido todos los tipos posibles de intervalos en  $\mathbb{R}$ , no habrá más intervalos cerrados que los ya mencionados (ya que cualquier otro tipo de intervalo es abierto).

□

**Teorema 1.4.** Sea  $X \neq \emptyset$  y  $\mathcal{C} \subset \mathcal{P}(X)$  cumpliendo

(C1)  $\emptyset, X \in \mathcal{C}$ .

(C2) Si  $\{F_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{C}$ , entonces  $\bigcap_{i \in I} F_i \in \mathcal{C}$ .

(C3) Si  $F_1, F_2 \in \mathcal{C}$ , entonces  $F_1 \cup F_2 \in \mathcal{C}$ .

Entonces existe una única topología  $\mathcal{T}$  en  $X$  tal que  $\mathcal{C}_\mathcal{T} = \mathcal{C}$ .

*Demostración.* La existencia queda probada definiendo  $\mathcal{T} = \{U \subset X : X \setminus U \in \mathcal{C}\}$ . La unicidad es inmediata ya que si  $\mathcal{C}_{\mathcal{T}'} = \mathcal{C}_\mathcal{T} \Rightarrow \mathcal{T} = \mathcal{T}'$ .

□

## 1.4. Bases de topología

**Definición 1.10.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t. Una familia de abiertos  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  es una **base** de la topología  $\mathcal{T}$  si  $\forall U \in \mathcal{T} \quad \exists \{B_i\} \subset \mathcal{B}$  tal que  $U = \bigcup_{i \in I} B_i$ .

A los elementos de  $\mathcal{B}$  se les llama **abiertos básicos**.

□

*Observación.*

- ) Ni  $\mathcal{B}$  ni la familia  $\{B_i\}_{i \in I}$  tienen que ser finitas o numerables
- ) La forma de escribir  $U = \bigcup_{i \in I} B_i$  puede no ser única.
- )  $\mathcal{T}$  es base de  $\mathcal{T}$  (trivialmente).
- ) Si  $\mathcal{B} \subset \mathcal{B}' \subset \mathcal{T}$  con  $\mathcal{B}$ , entonces  $\mathcal{B}'$  es base de  $\mathcal{T}$ .

□

**Proposición 1.5.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t y  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  una familia de abiertos. Son equivalentes:

- (i)  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}$ .
- (ii)  $\forall U \in \mathcal{T}, U \neq \emptyset \quad \forall x \in U \quad \exists B \in \mathcal{B}$  tal que  $x \in B \subset U$  (si tenemos un abierto de la topología podemos encontrar para cada punto suyo un abierto básico contenido en el abierto y que contiene al punto).

*Demostración.*

(i) $\Rightarrow$ (ii) Sea  $U \in \mathcal{T}, U \neq \emptyset$ . Sea  $x \in U \Rightarrow U = \bigcup_{i \in I} B_i$  con  $B_i \in \mathcal{B} \Rightarrow \exists i \in I$  tal que  $x \in B_i = B_x \subset U$

(ii) $\Rightarrow$ (i) Sea  $U \in \mathcal{T}$ .

- Si  $U = \emptyset \Rightarrow U = \bigcup_{i \in \emptyset} B_i = \emptyset$

- Si  $U \neq \emptyset \Rightarrow \forall x \in U \quad \exists B_x \in \mathcal{B}$  tal que  $x \in B_x \subset U \Rightarrow U = \bigcup_{x \in U} B_x$

□

**Ejemplo.**

- ) Sea  $(X, \mathcal{T}_d)$  un e.m. La familia  $base = \{B(x, r) : x \in X, r > 0\}$  de todas las bolas abiertas es una base de  $\mathcal{T}_d$ .
- ) En  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $\mathcal{B}_u = \{(a, b) : a < b\}$  es base de  $\mathcal{T}_u$  y se le llama **base usual**.
- ) En  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $\mathcal{B} = \{(a, b) : a, b \in \mathbb{Q}, a < b\}$  es base de  $\mathcal{T}_u$  (por la densidad de  $\mathbb{Q}$  en  $\mathbb{R}$ ).

- En  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$ ,  $\mathcal{B}_u = \{B(x, r) : x \in \mathbb{R}^n, r > 0\}$  es la base usual.  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$ ,  $\mathcal{B}_u = \{B(x, r) : x \in \mathbb{R}^n, r \in \mathbb{Q}, r > 0\}$  también es base de  $\mathcal{T}_u$  (numerable).
- En  $(X, \mathcal{T}_t)$ ,  $\mathcal{B} = \{X\}$  es base (la única que no contiene al vacío).
- $(X, \mathcal{T}_d)$ ,  $\mathcal{B} = \{\{x\} : x \in X\} \subset \mathcal{T}$  es base de  $\mathcal{T}_{disc}$ . Es la más económica ya que si  $\mathcal{B}'$  es base, entonces  $\mathcal{B} \subset \mathcal{B}'$ .

*Demostración.* Sea  $\{x\} \in \mathcal{T}_{disc}$ , como  $\mathcal{B}'$  es base podemos considerar  $x \in \{x\}$  y entonces  $\exists B \in \mathcal{B}'$  tal que  $x \in B \subset \{x\}$  y entonces  $B = \{x\} \subset \mathcal{B}' \forall x \in X \Rightarrow \mathcal{B} \subset \mathcal{B}'$   $\square$

- $(X, \mathcal{T}_{x_0})$ ,  $x_0 \in X \neq \emptyset$ ,  $\mathcal{B} = \{\{x, x_0\} : x \in X\}$  es una base. Esta es la base más económica.
- $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_{Sorgenfrey})$  (recordemos que  $U \in \mathcal{T}_S \iff \forall x \in U, \exists \varepsilon : [x, x + \varepsilon) \subset U$ ).  $\mathcal{B} = \{[x, x + \varepsilon) : x \in \mathbb{R}, \varepsilon > 0\}$  es base.  $\mathcal{B}' = \{[x, x + \varepsilon) : x \in \mathbb{Q}, \varepsilon \in \mathbb{Q}, \varepsilon > 0\}$  no lo es (ya que tomando un intervalo de la forma  $[x, x + \varepsilon)$  con  $x \in \mathbb{Q}$  entonces no existe ningún elemento de  $\mathcal{B}'$  que contenga a  $x$  y quede enmedio).

$\square$

**Teorema 1.6.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un espacio topológico y  $\mathcal{B}$  una base suya. Entonces:

(B1)  $X = \bigcup_{B \in \mathcal{B}} B$

(B2) Si  $B_1, B_2 \in \mathcal{B}$ ,  $x \in B_1 \cap B_2$ , entonces  $\exists B_3 \in \mathcal{B}$  con  $x \in B_3 \subset B_1 \cap B_2$

*Demostración.*

(B1) Trivial

(B2) Tenemos  $x \in B_1 \cap B_2 \in \mathcal{T}$  entonces, como  $\mathcal{B}$  es base  $\exists B_3 = B_x \in \mathcal{B}$  con  $x \in B_3 \subset B_1 \cap B_2$ .

$\square$

**Teorema 1.7.** Sean  $X \neq \emptyset$  un conjunto y  $\mathcal{B} \subset \mathcal{P}(X)$  cumpliendo:

(B1)  $X = \bigcup_{B \in \mathcal{B}} B$

(B2) Si  $B_1, B_2 \in \mathcal{B}$ ,  $x \in B_1 \cap B_2$ , entonces  $\exists B_3 \in \mathcal{B}$  con  $x \in B_3 \subset B_1 \cap B_2$

Entonces existe una única topología  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$  en  $X$  tal que  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$ . Además,

$$\begin{aligned} \mathcal{T}(\mathcal{B}) &= \{\emptyset\} \cup \{U \subset X : \exists \{B_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{B} \text{ con } U = \bigcup_{i \in I} B_i\} \\ &= \{\emptyset\} \cup \{U \in X : \forall x \in U \exists B = B_x \in \mathcal{B} \text{ con } x \in B \subset U\} \end{aligned}$$

Además,  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$  es la topología menos fina conteniendo a  $\mathcal{B}$ , es decir, si  $(X, \mathcal{T}')$  es un e.t y  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}'$ , entonces  $\mathcal{T}(\mathcal{B}) \leq \mathcal{T}'$ . A esta topología se le llama la **topología generada por  $\mathcal{B}$** .



*Demostración.* Empezaremos por probar la existencia. Para ello tendremos que ver que  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$  es una topología, probando que verifica las propiedades de las topologías:

(A1)  $\emptyset \in \mathcal{T}(\mathcal{B})$  por la definición de  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$ . Por **(B1)**, tenemos también que  $X \in \mathcal{T}(\mathcal{B})$ .

(A2) Sea  $\{U_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{T}(\mathcal{B})$  y sea  $x \in \bigcup_{i \in I} U_i \Rightarrow \exists i \in I : x \in U_i \in \mathcal{T}(\mathcal{B})$  por lo que  $\exists B_x \in \mathcal{B}$  tal que  $x \in B_x \subset U_i \subset \bigcup_{i \in I} U_i \Rightarrow \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}(\mathcal{B})$ .

(A3) Sean  $U_1, U_2 \in \mathcal{T}(\mathcal{B})$  (si la intersección es vacía es trivial). Consideramos  $x \in U_1 \cap U_2 \Rightarrow \exists B_1, B_2 \in \mathcal{B}$  con  $x \in B_1 \subset U_1$  y  $x \in B_2 \subset U_2$  por tanto  $x \in B_1 \cap B_2 \subset U_1 \cap U_2$ . Por **(B2)**, existe un  $B_3 \in \mathcal{B}$  tal que  $x \in B_3 \subset B_1 \cap B_2 \subset U_1 \cap U_2$  por lo que  $U_1 \cap U_2 \in \mathcal{T}(\mathcal{B})$ .

Con esto queda probado que es una topología. Tendremos que ver ahora que  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$ . Para ello empiezo viendo que  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$ . Por la segunda definición de  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$ , esto es evidente. Como verifica las hipótesis del Teorema 1.7, es base de  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$ .

Veamos ahora la unicidad. Sea  $(X, \mathcal{T}')$  un e.t. con  $\mathcal{B}$  base de  $\mathcal{T}'$ . Tendré que ver que  $\mathcal{T}' = \mathcal{T}$ . Sea  $\emptyset \neq U \subset X \Rightarrow U \in \mathcal{T}' \iff \forall x \in U \exists B \in \mathcal{B}$  con  $x \in B \subset U \iff U \in \mathcal{T}(\mathcal{B})$  ya que  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}'$ .

Nos queda ver que es la menos fina conteniendo a  $\mathcal{B}$ . Para ello, sea  $(X, \mathcal{T}')$  un e.t. tal que  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}'$ , entonces por **(A2)** tenemos que  $\mathcal{T}(\mathcal{B}) \subset \mathcal{T}'$ , lo cual es equivalente a decir que  $\mathcal{T}(\mathcal{B}) \leq \mathcal{T}'$ . □

### Ejemplo.

- Si  $X = \{a, b\}$  y  $\mathcal{B} = \{\{a\}\}$  no es base de ninguna topología en  $X$  (ya que no cumple **(B1)**).
- Si  $X = \{a, b, c\}$  y  $\mathcal{B} = \{\{a, b\}, \{b, c\}\}$ . Esta base verifica **(B1)** pero no **(B2)** (tomando  $x = b$  se ve fácilmente).
- Si  $X = \mathbb{R}$  y  $\mathcal{B} = \{[a, b] : a < b\}$ . Si tomamos dos intervalos  $[0, 1] \cap [1, 2]$ , su intersección es  $\{1\}$  y por tanto no verifica **(B2)** (tomando  $x = 1$ ).
- Si  $X = \mathbb{R}$  y  $\mathcal{B} = \{[a, b] : a \leq b\}$  es base de una topología,  $\mathcal{T}(\mathcal{B})$  en  $\mathbb{R}$ . Además,  $\mathcal{T}(\mathcal{B}) = \mathcal{T}_{disc}$ . □

**Proposición 1.8.** Sean  $X \neq \emptyset$  y  $\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2$  topologías en  $X$  con bases  $\mathcal{B}_1$  y  $\mathcal{B}_2$  respectivamente. Equivalen:

- (i)  $\mathcal{T}_1 \leq \mathcal{T}_2$ .
- (ii)  $\forall B_1 \in \mathcal{B}_1, x \in B_1, \exists B_2 \in \mathcal{B}_2$  con  $x \in B_2 \subset B_1$ .

*Demostración.*

- (i) $\Rightarrow$ (ii) Sea  $B \in \mathcal{B}_1$ . Por (i),  $\mathcal{B}_1 \subset \mathcal{T}_1 \subset \mathcal{T}_2$  y como  $\mathcal{B}_2$  es base de  $\mathcal{T}_2$ , aplicando la definición de base tengo que  $\exists B_2 \in \mathcal{B}_2$  con  $x \in B_2 \subset B_1$ .
- (ii) $\Rightarrow$  (i) Por (ii) tenemos que  $\mathcal{B}_1 \subset \mathcal{T}_2 \Rightarrow \mathcal{T}(\mathcal{B}_1) \leq \mathcal{T}_2$  (por el Teorema 1.7) y entonces  $\mathcal{T}_1 = \mathcal{T}(\mathcal{B}_1) \leq \mathcal{T}_2$ .

□

**Ejemplo.**

- ) En  $\mathbb{R}$ ,  $\mathcal{T}_u \leq \mathcal{T}_{Sorgenfrey}$ .
- ) Ejercicios 1 y 2 de la relación.

□

**Proposición 1.9.** Sean  $X \neq \emptyset$  y  $S \subset \mathcal{P}(X)$ ,  $S \neq \emptyset$ , Entonces,

$$\mathcal{B}(S) = \left\{ \bigcap_{i \in I} : I \text{ finito, } S_i \in S \ \forall i \in I \right\}$$

Es base de una única topología  $\mathcal{T}(S) = \mathcal{T}(\mathcal{B}(S))$  en  $X$ . A esta topología la llamaremos la **topología generada** por  $S$  y es la topología menos fina que contiene a  $S$ , es decir, si  $(X, \mathcal{T}')$  es un e.t. y  $S \subset \mathcal{T}'$ , entonces  $\mathcal{T}(S) \leq \mathcal{T}'$ .

Decimos que  $S$  es una **subbase** de  $\mathcal{T}(S)$ .

*Demostración.* Tendremos que comprobar **(B1)** y **(B2)** y que es la menos fina. □

**Ejemplo.**

- ) Toda base  $(X, \mathcal{T})$  es subbase de  $(X, \mathcal{T})$ .
- )  $S = \{X\}$  es subbase de  $\mathcal{T}_t$ .
- ) En  $\mathbb{R}$ ,  $S = \{(a, +\infty) : a \in \mathbb{R}\} \cup \{(-\infty, b) : b \in \mathbb{R}\}$  es subbase de  $\mathcal{T}_u$ .

□

**1.5. Entornos**

**Definición 1.11.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t y  $x \in X$ . Diremos que un conjunto  $N \subset X$  es un **entorno** de  $x$  si  $\exists U \in \mathcal{T}$  con  $x \in U \subset N$ .

Denotamos  $\mathcal{N}_x = \{N \subset X : N \text{ es entorno de } x\}$  y lo llamamos **sistema de entornos** del punto  $x$  en  $(X, \mathcal{T})$ .

□

**Ejemplo.**

- ) En  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $[0, 1) \in \mathcal{N}_x$  para todo  $x \in (0, 1)$ , pero no es entorno de 0 ni de 1.

□

*Observación.*

- )  $X \in \mathcal{N}_x \quad \forall x \in X \Rightarrow \mathcal{N}_x \neq \emptyset \quad \forall x \in X.$
- ) Si  $x \in U \in \mathcal{T} \Rightarrow U \in \mathcal{N}_x$
- ) Puede ocurrir que exista  $N \subset \mathcal{N}_x$  con  $N \notin \mathcal{T}.$

□

**Proposición 1.10.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $U \subset X$ . Equivalen:

- (i)  $U \in \mathcal{T}.$
- (ii)  $U \in \mathcal{N}_x \quad \forall x \in U.$

*Demostración.*

- (i)  $\Rightarrow$  (ii) Si  $U \in \mathcal{T}$ , entonces  $U \in \mathcal{N}_x \quad \forall x \in U$
- (ii)  $\Rightarrow$  (i)  $\forall x \in U \quad \exists U_x \in \mathcal{T}$  con  $x \in U_x \subset U \Rightarrow U = \bigcup_{x \in U} U_x \in \mathcal{T}.$

□

**Ejemplo.**

- )  $(X, \mathcal{T}_t), \mathcal{N}_x = \{X\} \quad \forall x \in X.$
- )  $(X, \mathcal{T}_{disc}), \mathcal{N}_x = \{N \subset X : x \in N\}$
- )  $(X, \mathcal{T}_{x_0}), \mathcal{N}_x = \{N \subset X : x_0, x \in N\}$
- )  $(X, d), \mathcal{N}_x = \{N \subset X : \exists \varepsilon > 0 \text{ con } B(x, \varepsilon) \subset N\}.$  En particular,  $\overline{B}(x, r) \in \mathcal{N}_x.$

□

**Proposición 1.11.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  e.t.,  $x \in X$ . Entonces:

- (N1)  $\mathcal{N}_x \neq \emptyset \quad \forall x \in X.$
- (N2) Si  $N \in \mathcal{N}_x$ , entonces  $x \in N.$
- (N3) Si  $N \in \mathcal{N}_x$  y  $N \subset N'$ , entonces  $N' \in \mathcal{N}_x.$
- (N4) Si  $N, N' \in \mathcal{N}_x$ , entonces  $N \cap N' \in \mathcal{N}_x.$
- (N5) Si  $N \in \mathcal{N}_x$ , entonces  $\exists N' \in \mathcal{N}_x$  con  $N' \subset N$  y  $N \in \mathcal{N}_y \quad \forall y \in N'.$

*Demostración.*

- (N5)  $N \in \mathcal{N}_x \Rightarrow \exists U \in \mathcal{T}$  con  $x \in U \subset N$ . Tomamos  $U = N'$  y se verifica que  $x \in U \in \mathcal{N}_x$ . Además  $U \subset N$  y tendré que ver que  $N \in \mathcal{N}_y \quad \forall y \in U$ . Como  $U \in \mathcal{T} \Rightarrow U \in \mathcal{N}_y \quad \forall y \in U \stackrel{(N3)}{\Rightarrow} N \in \mathcal{N}_y \quad \forall y \in U.$

□

**Proposición 1.12.** (Hausdorff, 1914) Sean  $X \neq \emptyset$  un conjunto y supongamos que tenemos  $\forall x \in X$  una familia  $\mathcal{M}_x \subset \mathcal{P}(X)$  cumpliendo **(N1)**, ..., **(N5)**. Entonces existe una única topología  $\mathcal{T}$  en  $X$  cuyos sistemas de entornos  $\mathcal{N}_x$  coinciden con  $\mathcal{M}_x \ \forall x \in X$  (es decir,  $\mathcal{N}_x = \mathcal{M}_x \ \forall x \in X$ ).

Además,  $\mathcal{T} = \{U \subset X : U \in \mathcal{M}_x \ \forall x \in U\} \cup \{\emptyset\}$ .

*Demostración.* Veamos en primer lugar que  $\mathcal{T}$  es una topología, comprobando que verifica **(A1)**, **(A2)**, **(A3)**. Esto se deja planteado como ejercicio para el lector.

Veamos que esa topología es única. Para ello supongamos que  $\exists \mathcal{T}'$  con  $\mathcal{N}'_x = \mathcal{M}_x (= \mathcal{N}_x)$ . Tenemos que  $U \in \mathcal{T}' \iff U \in \mathcal{N}'_x = \mathcal{N}_x \ \forall x \in U \iff U \in \mathcal{T}$ .

Nos queda probar que  $\mathcal{N}_x = \mathcal{M}_x \ \forall x \in X$ . Sea  $x \in X$ . Veamos la doble inclusión:

- $\subseteq$ )  $N \in \mathcal{N}_x \Rightarrow \exists U \in \mathcal{T}$  con  $x \in U \subset N$ . Por la definición de  $\mathcal{T}$ ,  $U \in \mathcal{M}_x$ .
- $\supseteq$ ) Sea  $N \in \mathcal{M}_x$ . Tendremos que comprobar que  $N \in \mathcal{N}_x$ . Esto ocurrirá si  $\exists U \in \mathcal{T}$  tal que  $x \in U \subset N$ . Definimos  $U = \{y \in N : N \in \mathcal{M}_y\}$ . Veamos que este conjunto verifica lo que buscamos. Comencemos viendo que  $x \in U$ . Es claro que  $N \in \mathcal{M}_x$  (por hipótesis) y además, por **(N2)** tenemos que  $x \in N$ , luego  $x \in U$ . Veamos ahora que  $U \subset N$ , lo cual es claro por la definición de  $U$ . Por último tendré que ver que  $U \in \mathcal{T}$  lo cual equivale a ver que  $U \in \mathcal{M}_y \ \forall y \in U$ . Para ello tomo  $y \in U$ . Tendremos que ver que  $U \in \mathcal{M}_y$ . Como  $y \in U \Rightarrow y \in N \in \mathcal{M}_y \xRightarrow{\text{(N5)}} \exists N' \in \mathcal{M}_y$  con  $N' \subset N$  y  $N \in \mathcal{M}_z \ \forall z \in N' \xRightarrow{\text{(N2)}} y \in N' \subset U \xRightarrow{\text{(N3)}} U \in \mathcal{M}_y$ .

□

### 1.5.1. Bases de Entornos

**Definición 1.12.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  e.t. y  $x \in X$ . Entonces una **base de entornos** de  $x$  en  $\mathcal{T}$  es una familia de entornos,  $\mathcal{B}_x \subset \mathcal{N}_x$  tal que  $\forall N \in \mathcal{N}_x \ \exists V \in \mathcal{B}_x$  con  $x \in V \subset N$ .

A los elementos de  $\mathcal{B}_x$  se les llama **entornos básicos**.

□

*Observación.*

- ) Si  $\mathcal{B}_x$  es b.d.e.<sup>4</sup>, entonces  $\mathcal{N}_x = \{N \subset X : \exists V \in \mathcal{B}_x \text{ con } V \subset N\}$ .
- )  $\mathcal{B}_x \neq \emptyset$ .
- )  $\mathcal{N}_x$  es una b.d.e. de  $x$ .
- )  $\mathcal{B}_x = \mathcal{N}_x \cap \mathcal{T} = \{U \subset \mathcal{T} : x \in U\}$  es también una b.d.e. de  $x$ .

<sup>4</sup>Notaremos así a las bases de entornos

- ) Si  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}$ , entonces  $\mathcal{B} \cap \mathcal{N}_x = \{B \in \mathcal{B} : x \in B\}$  es una b.d.e. de  $x$

*Demostración.* Sea  $N \in \mathcal{N}_x \Rightarrow \exists U \in \mathcal{T}$  con  $x \in U \subset N$ . Como  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}$ , entonces  $\exists B \in \mathcal{B}$  con  $x \in B \subset U \subset N$ .  $\square$

- ) En general, no todo entorno de un punto es unión de entornos básico. Por ejemplo,  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $x = 0$ ,  $\mathcal{B}_x = \{(a, b) : a < x < b\}$  es una b.d.e. de  $x$ . Tomamos  $[-1, 1) \in \mathcal{N}_x$  (es entorno de  $x = 0$ ) pero no es unión de elementos de  $\mathcal{B}_x$ .

$\square$

### Ejemplo.

- )  $(X, \mathcal{T}_u)$ ,  $x \in X \Rightarrow \mathcal{B}_x = \{X\}$  es la única b.d.e de  $x$  posible.
- )  $(X, \mathcal{T}_{disc})$ ,  $x \in X \Rightarrow \mathcal{B}_x = \{\{x\}\}$  es una b.d.e de  $x$  (la más “económica”).
- )  $(X, \mathcal{T}_{x_0})$ ,  $x \in X \Rightarrow \mathcal{B}_x = \{\{x, x_0\}\}$  es b.d.e de  $x$  (la más “económica”).
- )  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$ ,  $x \in X \Rightarrow \mathcal{B}_x = \{B(x, \varepsilon) : \varepsilon > 0\}$  es una b.d.e de  $x$ .  $\mathcal{B}_x = \{B(x, \varepsilon) : \varepsilon > 0, \varepsilon \in \mathbb{Q}\}$ ,  $\mathcal{B}_x = \{B(x, \varepsilon) : \varepsilon = \frac{1}{k}, k \in \mathbb{N}\}$ ,  $\mathcal{B}_x = \{B(x, \varepsilon) : \varepsilon = \frac{1}{k}, k \in \mathbb{N}, k \text{ par}\}$  también son bases de entornos de  $x$  (cada una más económica que la anterior).

$\square$

**Proposición 1.13.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $\mathcal{B}_x$  una b.d.e. de  $x \ \forall x \in X$  y  $U \subset X$ . Equivalen:

- (i)  $U \in \mathcal{T}$ .
- (ii)  $\forall x \in U \ \exists V = V_x \in \mathcal{B}_x$  con  $V_x \subset U$ .

*Demostración.*

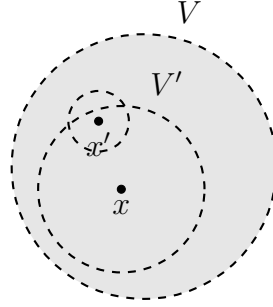
- (i)  $\Rightarrow$  (ii) Como  $U \in \mathcal{T}$ , entonces  $U \in \mathcal{N}_x \ \forall x \in U$ . Por tanto,  $\forall x \in U, \ \exists V_x \in \mathcal{B}_x$  con  $V_x \subset U$ .
- (ii)  $\Rightarrow$  (i) Por la hipótesis tenemos que  $U \in \mathcal{N}_x \ \forall x \in U$  por lo que  $U \in \mathcal{T}$  (por la Proposición 1.11)

$\square$

**Proposición 1.14.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t. y  $\mathcal{B}_x$  una b.d.e de  $x \ \forall x \in X$ . Entonces:

- (V1)  $\mathcal{B}_x \neq \emptyset$ .
- (V2) Si  $V \in \mathcal{B}_x$ , entonces  $x \in V$ .
- (V3) Si  $V_1, V_2 \in \mathcal{B}_x$ , entonces  $\exists V_3 \in \mathcal{B}_x$  con  $V_3 \subset V_1 \cap V_2$ . (En general, la intersección de dos abiertos básicos no tiene por qué ser abierto básico pero sí contener a uno).

(V4) Si  $V \in \mathcal{B}_x$ , entonces  $\exists V' \in \mathcal{B}_x$  con  $V' \subset V$  tal que  $\forall y \in V' \exists V_y \in \mathcal{B}_y$  con  $V_y \subset V$ .



*Demostración.*

(V4)  $V \in \mathcal{B}_x \subset \mathcal{N}_x$ , entonces, por (N5)  $\exists N' \in \mathcal{N}_x$  con  $N' \subset V$  tal que  $V \in \mathcal{N}_y$   $\forall y \in N'$ . Como  $\mathcal{B}_x$  es b.d.e,  $\exists V' \in \mathcal{B}_x$  con  $V' \subset N' \subset V$ .

Sea  $y \in V' \subset N' \Rightarrow V \in \mathcal{N}_y$ . Como  $\mathcal{B}_y$  es b.d.e,  $\exists V_y \in \mathcal{B}_y$  con  $V_y \subset V$ .

□

**Proposición 1.15.** Sea  $X \neq \emptyset$  un conjunto y supongamos que  $\forall x \in X$  tenemos una familia  $\mathcal{B}_x \subset \mathcal{P}(X)$  cumpliendo (V1), ..., (V4). Entonces existe una única topología  $\mathcal{T}$  en  $X$  tal que  $\mathcal{B}_x$  es b.d.e de  $x$  en  $(X, \mathcal{T})$   $\forall x \in X$ .

Además,  $\mathcal{T}$  es la única topología con  $\mathcal{N}_x = \{N \subset X : \exists V = V_x \in \mathcal{B}_x \text{ con } V_x \subset N\}$   $\forall x \in X$ .

*Demostración.* Tengo que comprobar que  $\mathcal{N}_x$  cumplen (N1), ..., (N5) usando que  $\mathcal{B}_x$  cumplen (V1), ..., (V4). La demostración se deja propuesta como ejercicio para el lector. □

**Ejercicio 1.5.1.** Sean  $(X, \mathcal{T})$  y  $(X, \mathcal{T}')$  espacios topológicos y  $\mathcal{B}_x$  b.d.e de  $x$  en  $(X, \mathcal{T})$   $\forall x \in X$ . Si  $V$  es entorno de  $x$  en  $\mathcal{T}'$   $\forall V \in \mathcal{B}_x$ , entonces  $\mathcal{T} \leq \mathcal{T}'$ . □

□

## 1.6. Puntos adherentes. Clausura

**Definición 1.13.** Sean  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A \subset X$ ,  $x \in X$ . Diremos que  $x$  es **adherente** de  $A$  si  $A \cap N \neq \emptyset$   $\forall N \in \mathcal{N}_x$ , es decir, si cada entorno del punto interseca al conjunto. Esto no implica que  $x \in A$ . Podemos distinguir dos tipos:

- Decimos que un punto adherente  $x$  es de **acumulación** de  $A$  si  $A \cap (N \setminus \{x\}) \neq \emptyset$   $\forall N \in \mathcal{N}_x$  (Esto no implica que  $x \in A$ ).
- Decimos que un punto adherente  $x$  es **aislado** de  $A$  si existe un entorno  $N \in \mathcal{N}_x$  tal que  $A \cap N = \{x\}$  (Esto sí implica que  $x \in A$ ).

□

**Proposición 1.16.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A \subset X, x \in X$ . Equivalen:

- (i)  $x$  es adherente a  $A$ .
- (ii)  $A \cap U \neq \emptyset \quad \forall U \in \mathcal{T} \text{ con } x \in U$ .
- (iii)  $\forall B \in \mathcal{B}$  con  $x \in B$ , donde  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}$ .
- (iv)  $A \cap V \neq \emptyset \quad \forall V \in \mathcal{B}_x$  con  $\mathcal{B}_x$  base de entornos de  $x$ .

*Demostración.*

- (iii)  $\Rightarrow$  (iv) Sea  $V \in \mathcal{B}_x \Rightarrow \exists U \in \mathcal{T} \text{ con } x \in U \subset V$ . Como  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}$ , entonces  $\exists B \in \mathcal{B} \text{ con } x \in B \subset U \subset V$ . Por hipótesis,  $B \cap A \neq \emptyset$ , por lo que  $V \cap A \neq \emptyset$
- (iv)  $\Rightarrow$  (i) Sea  $N \in \mathcal{N}_x$ . Como  $\mathcal{B}_x$  es base de entornos de  $x$ , entonces  $\exists V \in \mathcal{B}_x \text{ con } V \subset N$ . Por hipótesis,  $A \cap V \neq \emptyset \Rightarrow A \cap N \neq \emptyset$  por lo que  $x$  es adherente a  $A$ .

□

*Observación.* Los puntos de acumulación y los puntos aislados admiten una caracterización análoga.

□

**Definición 1.14.** Sea  $(X, \mathcal{T}), A \subset X$ . Se define la **adherencia** ( **clausura** o **cierre**) de  $A$  como  $\overline{A} = cl(A) = \{x \in X : x \text{ es adherente de } A\}$ .

□

**Ejemplo.**

- )  $\overline{\emptyset} = \emptyset$ .
- )  $A \subset \overline{A}$ . Para verlo puedo tomar  $x \in A, N \in \mathcal{N}_x$ , entonces  $x \in N \Rightarrow x \in N \cap A \neq \emptyset$  por lo que  $x \in \overline{A}$ .
- )  $\overline{X} = X$ .
- ) Sea  $(X, d)$  e.m. y tomamos  $A \subset X, x \in X$ . Entonces  $x \in \overline{A}$  si  $B(x, \varepsilon) \cap A \neq \emptyset \quad \forall \varepsilon > 0$ .

□

**Ejemplo.** En  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$

- )  $A = (0, 1) \Rightarrow \overline{A} = [0, 1]$  y todos los puntos son de acumulación.
- )  $A = (0, 1) \cup \{2\} \Rightarrow \overline{A} = [0, 1] \cup \{2\}$ . Además  $x$  es de acumulación  $\forall x \in [0, 1]$  y  $x = 2$  es aislado (ya que puedo considerar  $N = (\frac{3}{2}, \frac{5}{2}) \in \mathcal{N}_2$  y  $N \cap A = \{2\}$ ).

□

**Proposición 1.17.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t y  $A \subset X$ . Entonces:

- (i)  $\bar{A} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ .
- (ii) Si  $C \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$  y  $A \subset C$ , entonces  $\bar{A} \subset C$ , es decir, la adherencia es el cerrado más pequeño que contiene a  $A$ .
- (iii)  $A = \bar{A} \iff A \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ .

*Demostración.*

- (i) Supongamos que  $\bar{A} = X$ . Entonces  $\bar{A} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ . Supongamos ahora el caso  $\bar{A} \neq X \Rightarrow X \setminus \bar{A} \neq \emptyset$ . Tendré que ver si  $X \setminus \bar{A} \in \mathcal{T}$ . Para ello tomo  $x \in X \setminus \bar{A}$  y como  $x \notin \bar{A}$ , entonces  $\exists U \in \mathcal{T}$  con  $x \in U$ ,  $U \cap A = \emptyset$ , luego  $U \cap \bar{A} = \emptyset$ . Esto quiere decir que  $x \in U \subset X \setminus \bar{A}$  y entonces  $X \setminus \bar{A} \in \mathcal{N}_x \ \forall x \in X \setminus \bar{A}$  por lo que  $X \setminus \bar{A} \in \mathcal{T}$ .
- (ii) (Por reducción al absurdo) Supongamos  $\bar{A} \cap (X \setminus C) \neq \emptyset$  y considero  $x \in \bar{A} \cap (X \setminus C)$ , entonces, como  $(X \setminus C) \in \mathcal{T}$  tengo  $x \in (X \setminus C) \in \mathcal{T}$  y como  $x \in \bar{A}$ , entonces  $(X \setminus C) \cap A \neq \emptyset$ , pero como teníamos que  $A \subset C$  llegamos a contradicción.
- (iii)  $\Rightarrow) A = \bar{A} \xrightarrow{(i)} A \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ .  
 $\Leftarrow)$  Tengo que  $A \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$  y  $A \subset A$  (trivialmente)  $\xrightarrow{(ii)} \bar{A} \subset A$  y como  $A \subset \bar{A}$  (por lo visto anteriormente), se da la doble inclusión y tenemos que  $A = \bar{A}$ .

□

**Ejemplo.** (Ejercicio 23 de la Relación 1)

- a)  $(X, \mathcal{T}_t)$ ,  $A \subset X$ ,  $\#A \geq 2 \Rightarrow \bar{A} = X$  ya que  $X \cap A = A \neq \emptyset \ \forall x \in X$ .
- b)  $(X, \mathcal{T}_{disc})$ ,  $A \subset X \Rightarrow \bar{A} = A$  ya que  $A \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \ \forall A \subset X$ . Además, todos los puntos son aislados ya que  $\forall x \in \bar{A} \ \exists \{x\} \in \mathcal{N}_x$ ,  $A \cap \{x\} = \{x\}$ .
- c)  $(X, \mathcal{T}_{CF})$ ,  $A \subset X$  infinito, entonces  $\bar{A} = A$  (ya que al ser  $A$  finito es cerrado). Además, todos los puntos serán aislados, ya que  $\forall a \in A$  puedo considerar  $U = (X \setminus A) \cup \{a\} \in \mathcal{N}_a$  y  $U \cap A = \{a\}$ .
- d)  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_S)$  (una base de  $\mathcal{T}_S$  es  $\{[x, x + \varepsilon) : x \in \mathbb{R}, \varepsilon > 0\}$ ).  
 $A = (0, 1] \Rightarrow \bar{A} = [0, 1]$ . Además  $x$  es de acumulación  $\forall x \in [0, 1)$  y  $x = 1$  es aislado.  
 $A = (0, 1) \Rightarrow \bar{A} = [0, 1)$  (ya que puedo considerar  $N = [1, 2) \in \mathcal{N}_1$  y  $N \cap A = \emptyset$  luego  $1 \notin \bar{A}$ ).

**Ejemplo.**

- $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$ ,  $\overline{B(x, r)} = \bar{B}(x, r)$ . Esto no es cierto en todo espacio métrico.
- $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $\overline{(a, b)} = [a, b] = \overline{(a, b]} = \overline{[a, b)}$ .  $\bar{\mathbb{Q}} = \mathbb{R} = \overline{\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}}$ .

□



**Definición 1.15.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A \subset X$ ,  $A$  se dice **denso** si  $\overline{A} = X$ . El espacio  $(X, \mathcal{T})$  se dice **separable** si  $\exists A \subset X$  denso y numerable.

□

**Ejemplo.**

- )  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$  es separable  $\overline{\mathbb{Q}} = \mathbb{R}^n$ .
- )  $A \subset X$  denso  $\iff A \cap B \neq \emptyset \quad \forall B \in \mathcal{B}$  con  $\mathcal{B}$  base de  $\mathcal{T}$ .

**Proposición 1.18.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A, B \subset X$ . Entonces:

- (i)  $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$ .
- (ii) Si  $A \subset B$ , entonces  $\overline{A} \subset \overline{B}$ .
- (iii)  $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ .
- (iv)  $\overline{A \cap B} \subset \overline{A} \cap \overline{B}$  (la otra inclusión no se verifica en general, por ejemplo, en  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ , los conjuntos  $A = (0, 1)$ ,  $B = (1, 2)$ )

*Demostración.*

- (i)  $\overline{A} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$  luego  $\overline{\overline{A}} = \overline{A}$ .
- (ii)  $A \subset B \subset \overline{B} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \Rightarrow \overline{A} \subset \overline{B}$ .
- (iii)  $\subset) A \cup B \subset \overline{A} \cup \overline{B} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \Rightarrow \overline{A \cup B} \subset \overline{A} \cup \overline{B}$ .  
 $\supset) \left. \begin{array}{l} A \subset A \cup B \subset \overline{A \cup B} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \Rightarrow \overline{A} \subset \overline{A \cup B} \\ B \subset A \cup B \subset \overline{A \cup B} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \Rightarrow \overline{B} \subset \overline{A \cup B} \end{array} \right\} \Rightarrow \overline{A} \cup \overline{B} \subset \overline{A \cup B}$
- (iv)  $\left. \begin{array}{l} A \cap B \subset A \subset \overline{A} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \Rightarrow \overline{A \cap B} \subset \overline{A} \\ A \cap B \subset B \subset \overline{B} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \Rightarrow \overline{A \cap B} \subset \overline{B} \end{array} \right\} \Rightarrow \overline{A \cap B} \subset \overline{A} \cap \overline{B}$

□

## 1.7. Interior

**Definición 1.16.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un r.t.,  $A \subset X$ ,  $x \in X$  se dice **interior** de  $A$  si  $A \in \mathcal{N}_x$ . Denotamos  $\overset{\circ}{A} = \text{int}(A) = \{x \in A : x \text{ es interior de } A\}$  y lo llamamos **interior** de  $A$ .

□

**Ejemplo.** •)  $\overset{\circ}{X} = X$ ,  $\overset{\circ}{\emptyset} = \emptyset$ .

- )  $(X, \mathcal{T}_d)$ ,  $x \in \overset{\circ}{A} \iff \exists \varepsilon > 0$  tal que  $B(x, \varepsilon) \subset A$ .
- )  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $A = (0, 1)$ ,  $B = [0, 1) \cup \{2\} \Rightarrow \overset{\circ}{A} = A$ ,  $\overset{\circ}{B} = A$

**Propiedades.**  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A \subset X$ . Entonces:

- (i)  $\overset{\circ}{A} \subset A$  y  $\overset{\circ}{A} \in \mathcal{T}$ .
- (ii) Si  $U \in \mathcal{T}$  y  $U \subset A$ , entonces  $U \subset \overset{\circ}{A}$  ( $\overset{\circ}{A}$  es el mayor abierto contenido en  $A$ ).
- (iii)  $A \in \mathcal{T} \iff A = \overset{\circ}{A}$ .

*Demostración.*

- (i)  $\overset{\circ}{A} \subset A$  trivial porque  $A \in \mathcal{N}_x \ \forall x \in A^\circ$ .  $x \in A^\circ$ , tendremos que ver que  $A^\circ \in \mathcal{N}_x$ . Sabemos que  $A \in \mathcal{N}_x \Rightarrow \exists U \in \mathcal{T}$  con  $x \in U$ ,  $U \subset A$ . Tendremos que ver entonces si  $U \subset A^\circ$ . Como  $U \in \mathcal{T}$ , entonces  $U \in \mathcal{N}_y \ \forall y \in U$  y como  $U \subset A$ , entonces  $A \in \mathcal{N}_y \ \forall y \in U$  luego tenemos que  $U \subset A^\circ$ .
- (ii)  $U \in \mathcal{T}$ ,  $U \subset A$  y podemos comprobar que  $U \subset A^\circ$  (Igual que antes).
- (iii)  $\Rightarrow$   $A \in \mathcal{T}$ ,  $A \subset A$ , luego por (ii)  $A \subset A^\circ$  y por (i)  $A = A^\circ$ .  
 $\Leftarrow$  Por (i),  $A = A^\circ \in \mathcal{T}$ .

□

**Ejemplo.**

- $(X, \mathcal{T}_t)$ ,  $A \subset X$ ,  $A \neq X \Rightarrow A^\circ = \emptyset$ .
- $(X, \mathcal{T}_{disc})$ ,  $A \subset X \Rightarrow A^\circ = A$ .
- $(X, \mathcal{T}_{x_0})$ ,  $A \subset X \Rightarrow A^\circ = \begin{cases} A & \text{si } x_0 \in A \\ \emptyset & \text{si } x_0 \notin A \end{cases}$
- $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$ ,  $(\overline{B}(x, r))^\circ = B(x, r) \ \forall x \in \mathbb{R}^n, r > 0$ . Esto no es cierto en cualquier espacio métrico.
- $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $[a, b]^\circ = (a, b) = [a, b)^\circ = (a, b]^\circ = (a, b)^\circ$ .
- $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $\mathbb{Q}^\circ = \emptyset = (\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q})^\circ$ .
- $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_{Sorgenfrey})$ ,  $[0, 1)^\circ = [0, 1) = [0, 1]^\circ$ ,  $(0, 1]^\circ = (0, 1)$ .

□

**Proposición 1.19.** Sea  $(X, \mathcal{T})$ ,  $A \subset X$ . Se tienen:

- (i)  $X \setminus \overline{A} = (X \setminus A)^\circ$ .
- (ii)  $X \setminus A^\circ = \overline{X \setminus A}$ .

*Demostración.*

- (i)  $\subset$   $A \subset \overline{A} \Rightarrow X \setminus \overline{A} \subset X \setminus A \Rightarrow X \setminus \overline{A} \subset (X \setminus A)^\circ$ .  
 $\supset$  Sabemos que  $(X \setminus A)^\circ \subset X \setminus A \Rightarrow A \subset X \setminus (X \setminus A)^\circ$  y como  $X \setminus (X \setminus A)^\circ \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \Rightarrow \overline{A} \subset X \setminus (X \setminus A)^\circ \Rightarrow (X \setminus A)^\circ \subset X \setminus \overline{A}$ .
- (ii)  $A = X \setminus A \Rightarrow X \setminus \overline{(X \setminus A)} = A^\circ \Rightarrow \overline{A \setminus A} = X \setminus A^\circ$ .

□

**Definición 1.17.** Sea  $(X, \mathcal{T})$ ,  $A \subset X$ , se llama **exterior** de  $A$  al conjunto  $A^e = ext(A) = (X \setminus A)^\circ = X \setminus \overline{A}$ .

□

## 1.8. Frontera

**Definición 1.18.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A \subset X$ ,  $x \in X$ . Se dice que  $x$  es **frontera** de  $A$  si  $x \in \overline{A} \cap \overline{X \setminus A}$ . Se denomina **frontera** de  $A$  al conjunto  $\partial A = fr(A) = \overline{A} \cap \overline{X \setminus A} = \{x \in X : x \text{ es frontera de } A\}$ .

□

**Proposición 1.20.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A \subset X$ . Se tienen:

- (i)  $\partial A = \overline{A} \setminus A^\circ$ . Esto se ve sabiendo que  $\partial A = \overline{A} \cap \overline{(X \setminus A)} = \overline{A} \setminus (X \setminus A^\circ) = \overline{A} \setminus A^\circ$ .
- (ii)  $\partial A \in \mathcal{C}_\mathcal{T}$  (ya que es intersección de 2 conjuntos cerrados).
- (iii)  $\partial A = \partial(X \setminus A)$ . Esto es porque  $\partial(X \setminus A) = \overline{X \setminus A} \cap \overline{X} = \overline{X \setminus A} \cap \overline{A}$ .
- (iv)  $\overline{A} = A^\circ \sqcup \partial A$  (unión disjunta). Esto es porque  $\overline{A} = A^\circ \sqcup (\overline{A} \setminus A^\circ)$ .
- (v)  $A^\circ = A \setminus \partial A$ .
- (vi)  $X \setminus A^\circ = \partial A \sqcup A^e$ .
- (vii)  $A \in \mathcal{C}_\mathcal{T} \iff \partial A \subset A$ . (trivial con definiciones)
- (viii)  $A \in \mathcal{T} \iff \partial A = \emptyset$ .
- (ix)  $A \in (\mathcal{T} \cap \mathcal{C}_\mathcal{T}) \iff \partial A = \emptyset$ .
- (x)  $\partial(A \cup B) \subset (\partial A \cup \partial B)$

□

**Ejemplo.**

- $(X, \mathcal{T}_t), A \subset X \Rightarrow \partial A = \begin{cases} \emptyset & \text{si } A \in \{X, \emptyset\} \\ X & \text{si } A \notin \{X, \emptyset\} \end{cases}$
- $(X, \mathcal{T}_{disc}), A \subset X \Rightarrow \partial A = \emptyset$ .
- $(X, \mathcal{T}_{x_0}), A \subset X \Rightarrow \partial A = \begin{cases} X \setminus A & \text{si } x_0 \in A \\ A & \text{si } x_0 \notin A \end{cases}$
- $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u), \partial B(x, r) = \partial \overline{B}(x, r) = S(x, r)$ .
- $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u), \partial[a, b] = \{a, b\} = \partial(a, b) = \partial[a, b) = \partial(a, b], \partial\mathbb{Q} = \mathbb{R} = \partial(\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q})$ .

## 1.9. Topología inducida. Subespacio topológico

**Proposición 1.21.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t. y sea  $A \subset X$ ,  $A \neq \emptyset$  un conjunto. Entonces el conjunto

$$\mathcal{T}_A = \mathcal{T}|_A = \{U \cap A : U \in \mathcal{T}\} \subset \mathcal{P}(A)$$

es una topología en  $A$  por lo que  $(A, \mathcal{T}_A)$  es un e.t.

*Demostración.* Para demostrarlo tendremos que ver que  $\mathcal{T}_A$  es una topología, es decir que verifica las propiedades:

- (A1) Sabemos que  $\emptyset \in \mathcal{T}$  y como  $\emptyset \cap A = \emptyset$  entonces  $\emptyset \in \mathcal{T}_A$ . Análogamente,  $X \in \mathcal{T}$  y  $X \cap A = A$  por lo que  $A \in \mathcal{T}_A$ .
- (A2) Sea  $\{O_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{T}_A$ . Tendremos que comprobar que  $\bigcup_{i \in I} O_i \in \mathcal{T}_A$ . Para ello sabemos que para cada  $i \in I$  se verifica que  $O_i = U_i \cap A$  donde  $U_i \in \mathcal{T}$ . Tenemos entonces

$$\bigcup_{i \in I} O_i = \bigcup_{i \in I} (U_i \cap A) = \left( \bigcup_{i \in I} U_i \right) \cap A \in \mathcal{T}_A$$

- (A3) Sean  $O_1, O_2 \in \mathcal{T}_A$ , tendremos que ver que  $O_1 \cap O_2 \in \mathcal{T}_A$ . Para ello sabemos que

$$O_1 = U_1 \cap A \quad O_2 = U_2 \cap A \quad U_1, U_2 \in \mathcal{T}$$

Por tanto,  $O_1 \cap O_2 = (U_1 \cap A) \cap (U_2 \cap A) = (U_1 \cap U_2) \cap A \in \mathcal{T}_A$  ya que  $(U_1 \cap U_2) \in \mathcal{T}$ .

□

**Definición 1.19.** Diremos que  $\mathcal{T}_A$  es la **topología inducida** por  $\mathcal{T}$  sobre  $A$ , y que  $(A, \mathcal{T}_A)$  es un **subespacio topológico** de  $(X, \mathcal{T})$ . De un conjunto  $O \in \mathcal{T}_A$  diremos que es **abierto** en  $A$ .

□

*Observación.*

- ) Sea  $O \subset A$ , entonces  $O \in \mathcal{T}_A \iff \exists U \in \mathcal{T}$  con  $O = U \cap A$ .
- ) Sea  $O \subset A$ , entonces  $O \in \mathcal{T} \Rightarrow O \in \mathcal{T}_A$  (ya que  $O = O \cap A$ ). El recíproco no es cierto ya que no todo abierto de un subespacio tiene que ser abierto en el espacio. Por ejemplo, en  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$  consideramos  $A = [0, 3)$ , entonces  $[0, 1) \in \mathcal{T}_A$  pero  $[0, 1) \notin \mathcal{T}_u$  (podemos considerar  $[0, 1) = (-1, 1) \cap A$ ).

□

**Proposición 1.22.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $\emptyset \neq A \subset X$ ,  $a \in A$ . Se tienen:

- (i)  $C \subset A$  es cerrado en  $A$  ( $C \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}_A}$ )  $\iff \exists C' \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$  con  $C = C' \cap A$ .
- (ii)  $N \subset A$  es entorno de  $a$  en  $A$  ( $N \in \mathcal{N}_a^{\mathcal{T}_A}$ )  $\iff \exists N' \in \mathcal{N}_a^{\mathcal{T}}$  con  $N = N' \cap A$ .
- (iii) Si  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}$ , entonces  $\mathcal{B}_A = \{B \cap A : B \in \mathcal{B}\}$  es base de  $\mathcal{T}_A$ .
- (iv) Si  $\mathcal{B}_a$  es b.d.e. de  $a$  en  $(X, \mathcal{T})$ , entonces  $(\mathcal{B}_A)_a = \{V \cap A : V \in \mathcal{B}_a\}$  es b.d.e. de  $a$  en  $(A, \mathcal{T}_A)$ .
- (v)  $E \subset A \Rightarrow \overline{E}^A = \overline{E} \cap A$ .
- (vi)  $E \subset A \Rightarrow E^{\circ A} \supset E^{\circ} \cap A$ . La otra inclusión no es cierta en general. Por ejemplo, en  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$  consideramos  $A = [0, 2)$  y  $E = [0, 1)$ . Entonces tenemos que  $E^{\circ A} = E$  pero  $E^{\circ} \cap A = (0, 1)$ .
- (vii)  $E \subset A \Rightarrow fr_A(E) \subset fr(E) \cap A$ .

*Demostración.*

- (i)  $\Rightarrow$   $C \subset A$  cerrado en  $A \Rightarrow A \setminus C \in \mathcal{T}_A \Rightarrow \exists U \in \mathcal{T}$  con  $A \setminus C = U \cap A \Rightarrow C = A \setminus (A \cap A) = A \cap (X \setminus U)$ , donde  $X \setminus U$  es cerrado por lo que puedo tomar  $C' = X \setminus U \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$  y se tiene lo buscado.  
 $\Leftarrow$  Sea  $C' \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ . Tendremos que ver que  $C = C' \cap A$  es cerrado en  $A$ , lo cual equivale a ver que  $A \setminus C \in \mathcal{T}_A$ . Tenemos que  $A \setminus C = A \setminus (C' \cap A) = A \cap (X \setminus C') \in \mathcal{T}_A$ , ya que  $X \setminus C'$  es abierto en  $\mathcal{T}$ .
- (ii)  $\Rightarrow$  Sea  $N$  un entorno de  $a$  en  $A$ . Entonces existe un  $U \in \mathcal{T}_A$  con  $a \in U \subset N$  lo cual implica que  $\exists U' \in \mathcal{T}$  con  $U = U' \cap A$ . Tomamos  $N' = U' \cup N \in \mathcal{N}_a$ . Tenemos que  $N' \cap A = (U' \cup N) \cap A = (U' \cap A) \cup (N \cap A) = U$ .
- (iii) Para ver que se verifica tendremos que probar la doble inclusión:
  - $\supset$ )  $\mathcal{B}_A = \{B \cap A : B \in \mathcal{B}\} \subset \mathcal{T}_A$  y se verifica.
  - $\subset$ ) Sea  $O \in \mathcal{T}_A$ ,  $x \in O$ . Entonces  $\exists U \in \mathcal{T}$  con  $x \in O = U \cap A$ . Como  $\mathcal{B}$  es base de  $\mathcal{T}$ ,  $\exists B \in \mathcal{B}$  tal que  $x \in B \subset U \Rightarrow x \in (B \cap A) \subset (U \cap A) = O$ .
- (iv) Análogo a (iii).
- (v) De nuevo tendremos que ver la doble inclusión:
  - $\subset$ )  $E \subset (\overline{E} \cap A) \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}_A} \Rightarrow \overline{E}^A \subset (\overline{E} \cap A)$ , ya que  $\overline{E} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}}$ .
  - $\supset$ ) Sea  $a \in \overline{E} \cap A$  y  $N$  un entorno de  $a$  en  $A$ . Tendremos que ver si  $N \cap E \neq \emptyset$ . Para ello sabemos que  $\exists N' \in \mathcal{N}_a$  con  $N = N' \cap A$  por lo que  $N \cap E = N' \cap A \cap E = N' \cap E \neq \emptyset \Rightarrow a \in \overline{E}^A$ .

□

**Ejemplo.**

- $(X, \mathcal{T}_t), \emptyset \neq A \subset X, \mathcal{T}_{t_A} = \{\emptyset, A\} = \mathcal{T}_t$ .
- $(X, \mathcal{T}_{disc}), A \subset X, \mathcal{T}_{disc_A} = \mathcal{T}_{disc}$ .

- )  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$ ,  $\mathcal{T}_{u_{\mathbb{Z}}} = \mathcal{T}_{disc}$ ,  $\{p\} = (p - \frac{1}{2}, p + \frac{1}{2}) \cap \mathbb{Z}$ .  $\mathcal{T}_{u_{\mathbb{N}}} = \mathcal{T}_{disc}$ .
- ) Ejercicio  $\emptyset \neq A' \subset A \subset X$ ,  $(\mathcal{T}_A)_{A'} = \mathcal{T}_{A'}$ .
- )  $(X, \mathcal{T}_d)$ ,  $\emptyset \neq A \subset X \Rightarrow d_A : A \times A \rightarrow [0, +\infty)$  tal que  $(x, y) \mapsto d_A(x, y) = d(x, y)$ . Entonces  $d_A$  es una distancia en  $A$  y  $(A, \mathcal{T}_{d_A})$  es un espacio topológico y  $\mathcal{T}_{d_A} = (\mathcal{T}_d)_A$ . Todo subespacio de un e.t. metrizable es metrizable.
- )  $(X, \mathcal{T}_d)$ ,  $\emptyset \neq A \subset X$  finito  $\Rightarrow (\mathcal{T}_d)_A = \mathcal{T}_{disc}$  (ya que  $\exists \varepsilon > 0 : d(x, y) > \varepsilon \ \forall x \neq y$  y tomando  $B(x, \varepsilon) \cap A = \{x\}$  se verifica).

□

**Definición 1.20.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t.,  $A \subset X$  con  $A \neq \emptyset$ , decimos que  $A$  es **discreto** si  $\mathcal{T}_A$  es la topología discreta en  $A$ .

□

**Definición 1.21.** Una propiedad topológica se dice **hereditaria** si al cumplirla un e.t.  $(X, \mathcal{T})$  también la cumplen todos sus subespacios, es decir, si  $(X, \mathcal{T})$  cumple  $P \Rightarrow (A, \mathcal{T}_A)$  cumple  $P \ \forall A \subset X, A \neq \emptyset$ .

□

**Ejemplo.**

- ) "Ser metrizable.<sup>es</sup> una propiedad hereditaria.
- ) "Tener la topología discreta.<sup>es</sup> hereditario (trivialmente).

□

## 1.10. Axiomas de separación

**Definición 1.22.** Un e.t.  $(X, \mathcal{T})$  se dice:

- ) **T1** (o de **Fréchet**, o que satisface el **primer axioma de separación**) si  $\forall x, y \in X$  con  $x \neq y$ ,  $\exists V \in \mathcal{N}_x, W \in \mathcal{N}_y$  con  $y \notin V, x \notin W$ . Esta definición se podría hacer análogamente con abiertos, abiertos básicos o entornos básicos.
- ) **T2** (o de **Hausdorff**, o que satisface el **segundo axioma de separación**) si  $\forall x, y \in X$  con  $x \neq y$ ,  $\exists V \in \mathcal{N}_x, W \in \mathcal{N}_y$  tal que  $V \cap W = \emptyset$ . De nuevo esta definición se podría hacer con abiertos, abiertos básicos o entornos básicos.

□

*Observación.*

- )  $T2 \Rightarrow T1$ .

□

**Proposición 1.23.** T1 y T2 son propiedades hereditarias.

*Demostración.* Ambas demostraciones son análogas por lo que haremos solo la demostración para T2.

Supongamos  $(X, \mathcal{T})$  un e.t. T2 y  $\emptyset \neq A \subset X$ . Tendré que ver que  $(S, \mathcal{T}_A)$  es T2. Sean  $a, a' \in A$  con  $a \neq a'$ . Como  $(X, \mathcal{T})$  es T2 tenemos que  $\exists V \in \mathcal{N}_a, W \in \mathcal{N}_{a'}$ , con  $V \cap W = \emptyset$ . Defino  $V' = V \cap A \in \mathcal{N}_a^A$  y  $W' = W \cap A \in \mathcal{N}_{a'}^A$  y tengo que  $V' \cap W' = (V \cap W) \cap A = \emptyset$

La demostración para T1 se deja como ejercicio (a pesar de ser análoga).  $\square$

### Ejemplo.

- $(X, \mathcal{T}_t)$ , con  $\#X > 2$ , no es T1 (ya que el único entorno de cualquier punto es  $X$ ). (por ser no es ni T0, aunque este concepto no se va a trabajar en esta asignatura).
- $(X, \mathcal{T}_{disc})$  es T2 (y por tanto T1). Para verlo puedo tomar  $x \neq y$  y tengo  $\{x\} \in \mathcal{N}_x, \{y\} \in \mathcal{N}_y$  y  $\{x\} \cap \{y\} = \emptyset$ .
- $(X, \mathcal{T})$  es T2 (ya se vio anteriormente) y por tanto T1.
- Si  $X$  es un conjunto infinito, entonces  $(X, \mathcal{T}_{CF})$  es T1, pero no T2. Comprobémoslo:

T1)  $x \neq y, x, y \in X$ . Cojo  $V = X \setminus \{y\} \in \mathcal{T}_{CF}$  y además  $V \in \mathcal{N}_x$  con  $y \notin V$ . Repetimos el proceso para  $x$  y llegamos a lo mismo.

T2) (por reducción al absurdo) Supongamos  $x \neq y$  y que existen  $V \in \mathcal{N}_x, W \in \mathcal{N}_y$  con  $V \cap W = \emptyset$ . Entonces  $X \setminus (V \cap W) = X = (X \setminus V) \cup (X \setminus W)$  que es finito por ser unión de conjuntos finitos, pero  $X$  es infinito por lo que llegamos a contradicción.

$\square$

**Proposición 1.24.** (Caracterización de T1) Un e.t.  $(X, \mathcal{T})$  es T1  $\iff \{x\} \in \mathcal{C}_{\mathcal{T}} \forall x \in X$ .

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Supongamos  $(X, \mathcal{T})$  un e.t. T1,  $x \in X$ , tendré que ver que  $\overline{\{x\}} = \{x\}$ . Veámoslo por reducción al absurdo. Para ello, supongamos que  $\exists y \in X, y \in \overline{\{x\}}$  y  $y \neq x \Rightarrow x \in N \forall N \in \mathcal{N}_y$ . Esto contradice que  $(X, \mathcal{T})$  sea T1.

$\Leftarrow$ ) Sean  $x, y \in X$  con  $x \neq y$  y tomo  $V = X \setminus \{y\} \in \mathcal{T}$  (por hipótesis, al ser complementario de cerrado). Además como  $x \in V$ , tenemos  $V \in \mathcal{N}_x$  y además  $y \notin V$ . Repetimos este razonamiento para  $y$  y tenemos que  $(S, \mathcal{T})$  es T1.

$\square$

**Ejercicio 1.10.1.** Sea  $(X, \mathcal{T})$  un e.t. T2 y  $\{y_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset X$  una sucesión convergente, entonces tiene un único límite.