

# Topología II

FACULTAD  
DE  
CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE GRANADA



Los Del DGIIM, [losdeldgiim.github.io](https://losdeldgiim.github.io)

Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas  
Universidad de Granada



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

Eres libre de compartir y redistribuir el contenido de esta obra en cualquier medio o formato, siempre y cuando des el crédito adecuado a los autores originales y no persigas fines comerciales.

# Topología II

Los Del DGIIM, [losdeldgiim.github.io](https://losdeldgiim.github.io)

Jesús Muñoz Velasco

Granada, 2023-2024



# Índice general

0.1. Conexión . . . . .	5
0.2. Conexión por arcos . . . . .	6



# Tema 0. Conexión por arcos

## 0.1. Conexión

**Notación.** Notaremos por e.t. al espacio topológico  $(X, \mathcal{T})$  o diremos  $X$  es un e.t.

**Definición 0.1.** Se dice que un e.t.  $X$  es no conexo si existen  $U$  y  $V$  abiertos disjuntos y no vacíos tales que  $X = U \cup V$ .

**Proposición 0.1.** *Dado un e.t.  $X$  equivalen las siguientes afirmaciones:*

- (i)  $X$  es conexo.
- (ii) Los únicos subconjuntos de  $X$  que son abiertos y cerrados a la vez son el vacío y el total.
- (iii) Los únicos subconjuntos de  $X$  con frontera vacía son el vacío y el total.

**Teorema 0.2.** *El ser conexo se conserva por aplicaciones continuas. En particular, ser conexo es una propiedad topológica (se conserva por homeomorfismos).*

**Teorema 0.3.** *La unión de una colección de subconjuntos conexos que tienen un punto común de un e.t.  $X$  es también conexa.*

**Teorema 0.4.** *Si  $A$  es un subconjunto del e.t.  $X$  y  $A$  es conexo, entonces dado  $B$  con  $A \subset B \subset \overline{A}$ , entonces se tiene que  $B$  también es conexo. En particular, la adherencia de un conexo siempre es un conjunto conexo.*

**Teorema 0.5.** *Dados dos espacios topológicos  $X, Y$  se cumple que  $X \times Y$  es conexo (con la topología producto) si y solo si  $X$  e  $Y$  son conexos.*

**Teorema 0.6.** *Los conjuntos conexos de  $\mathbb{R}$  con la topología usual son exactamente los intervalos (incluyendo los puntos).*

**Definición 0.2.** Dados un e.t.  $X$  y un punto  $x_0$  se define la componente conexa de  $x_0$  en  $X$  como el mayor conexo de  $X$  que contiene a  $x_0$

**Teorema 0.7.** *Las componentes conexas de un e.t.  $X$  forman una partición de  $X$  en conjuntos conexos maximales y cerrados.*

## 0.2. Conexión por arcos

**Definición 0.3.** Un **arco** (o camino) en un espacio topológico  $X$  es una aplicación continua  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ . Si además  $\alpha(0) = \alpha(1)$  diremos que  $\alpha$  es un lazo.

Diremos que un arco  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$  une  $x$  con  $y$  si se verifica que  $\alpha(0) = x$  y  $\alpha(1) = y$ . Si  $\alpha$  es un arco, diremos que está basado en  $x$  (o su punto base es  $x$ ) si  $\alpha(0) = x = \alpha(1)$ .

Denotaremos por

$$\Omega(X; x, y) = \{\alpha : [0, 1] \rightarrow X \text{ continua} : \alpha(0) = x, \alpha(1) = y\}$$

al **conjunto de arcos** que unen  $x$  con  $y$ . Denotaremos además por

$$\Omega(X; x) = \{\alpha : [0, 1] \rightarrow X \text{ continua} : \alpha(0) = x = \alpha(1)\}$$

al **conjunto de lazos** basados en  $x$ .

**Ejemplo.**

1. Dados un e.t.  $X$  y un punto  $x_0 \in X$  siempre se tiene que

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x_0} : [0, 1] &\rightarrow X \\ t &\mapsto x_0 \end{aligned}$$

es un lazo basado en  $x_0$  al que llamaremos **arco constante**. De hecho, si  $X$  tiene la topología discreta, entonces los únicos arcos que hay en  $X$  son los arcos constantes.

*Demostración.* Si  $X$  tiene la topología discreta, entonces como  $\alpha$  es continua  $\alpha^{-1}(\{x_0\})$  será abierto y cerrado y por tanto  $\alpha^{-1}(\{x_0\}) \in \{\emptyset, X\}$  por ser  $X$  conexo.  $\square$

2. Sean  $x, y, z \in X$ ,  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$  un arco uniendo  $x$  con  $y$  y  $\beta : [0, 1] \rightarrow X$  un arco uniendo  $y$  con  $z$ . Buscaremos ahora un arco formado a partir de estos dos de la siguiente forma:

$$\alpha * \beta : [0, 1] \rightarrow X : (\alpha * \beta)(t) = \begin{cases} \alpha(2t) & \text{si } 0 \leq t \leq 1/2 \\ \beta(2t - 1) & \text{si } 1/2 \leq t \leq 1 \end{cases}$$

Entonces  $\alpha * \beta$  es continua ya que  $(\alpha * \beta)|_{[0, 1/2]}$  y  $(\alpha * \beta)|_{[1/2, 1]}$  lo son y para  $t = 1/2$  se tiene que

$$\alpha\left(2 \cdot \frac{1}{2}\right) = \alpha(1) = \beta(0) = \beta\left(2 \cdot \frac{1}{2} - 1\right)$$

con  $[0, \frac{1}{2}]$  y  $[\frac{1}{2}, 1]$  cerrados. Aplicando el lema de pegado<sup>1</sup> tenemos que  $\alpha * \beta$  es continua.

---

<sup>1</sup>visto en Topología I



3. Si  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$  es un arco uniendo  $x$  con  $y$ , entonces

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha} : [0, 1] &\rightarrow X \\ t &\mapsto \alpha(1 - t)\end{aligned}$$

es un arco que une  $y$  con  $x$ .

**Definición 0.4.** Decimos que un e.t.  $X$  es **arcoconexo** (o **conexo por arcos**) si para cualesquiera  $x, y \in X$  existe un arco en  $X$  que une el punto  $x$  con el punto  $y$ .

Si  $X$  es un e.t. y  $A \subset X$ , diremos que  $A$  es arcoconexo si  $A$  es arcoconexo con la topología de inducida de  $X$ .

**Teorema 0.8.** *Todo espacio topológico arcoconexo es conexo.*

*Demostración.* Dado  $x_0 \in X$  fijo y otro punto  $x \in X$  cualquiera, sabemos que existe  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$  un arco tal que  $\alpha(0) = x_0$  y  $\alpha(1) = x$ . En particular, como el intervalo  $[0, 1]$  es conexo y  $\alpha$  es continua, entonces se tiene que  $\alpha([0, 1])$  es conexo y podremos escribir

$$X = \bigcup_{x \in X} \{x\} \subseteq \bigcup_{x \in X} \alpha_x([0, 1]) \in X \Rightarrow X = \bigcup_{x \in X} \alpha_x\{[0, 1]\}$$

y además  $x_0 \in \bigcap_{x \in X} \alpha_x\{[0, 1]\}$  por lo que  $X$  es conexo (por el lema del peine).  $\square$

**Ejemplo.** Veamos que la otra implicación no es cierta en general. Para ello consideramos los siguientes conjuntos:

$$X_0 = \{1\} \times [0, 1] \quad \text{y} \quad X_n = [0, 1] \times \left\{ \frac{1}{n} \right\}, \quad n \in \mathbb{N}$$

Llamamos  $X = \{(0, 0)\} \cup \left( \bigcup_{n \in \mathbb{N} \cup \{0\}} X_n \right)$  y queremos ver que  $X$  es conexo pero no es arcoconexo.

Si tomamos la segunda parte de esta unión, es decir,

$$Y = \bigcup_{n \in \mathbb{N} \cup \{0\}} X_n$$

tenemos que  $Y$  es conexo porque es unión de los  $X_n$  que son todos conexos y que intersecan con  $X_0$ . Entonces, como  $Y \subset X \subset \overline{Y}$  tenemos que  $X$  es conexo. Veamos sin embargo que  $X$  no es arcoconexo.

Para ello vamos a demostrar que si  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X : \alpha$  es continua con  $\alpha(0) = (0, 0)$ , entonces  $\alpha(t) = (0, 0)$  para todo  $t \in [0, 1]$ .

Podemos escribir la curva como  $\alpha(t) = (x(t), y(t)) \in \mathbb{R}^2$ . Como  $\alpha(0) = (0, 0)$ , si tomamos  $((-1/2, 1/2) \times (-1/2, 1/2)) \cap X$  un abierto que contiene al origen, entonces  $\exists \varepsilon > 0$  tal que  $\alpha([0, \varepsilon)) \subseteq ((-1/2, 1/2) \times (-1/2, 1/2)) \cap X$  por ser  $\alpha$  continua. Como

$y(t)$  es continua y se tiene que  $y([0, \varepsilon)) \subseteq \{0\} \cup \left( \bigcup_{n>2} \left\{ \frac{1}{n} \right\} \right)$ . Por el teorema del valor intermedio tenemos que  $y([0, \varepsilon)) = \{0\}$  por lo que  $\alpha([0, \varepsilon)) = \{(0, 0)\}$ . De esta forma hemos probado que no hay ningún arco que conecte  $(0, 0)$  con un punto distinto (el único arco es el constante).

**Teorema 0.9.** Si  $A \subseteq \mathbb{R}^n$  es estrellado, entonces  $A$  es arcoconexo.

*Demostración.* Como  $A$  es estrellado existe un  $x_0 \in A$  tal que para cualquier  $x \in A$ , el segmento que los une,  $(1-t)x + tx_0 \in A$  para todo  $t \in [0, 1]$  y entonces  $\alpha(t) = (1-t)x + tx_0$  es una curva continua uniendo  $x$  con  $x_0$ . Dados dos puntos cualesquiera  $x, y \in A$  se tiene que  $\alpha_x * \tilde{\alpha}_y$  es una curva continua que une  $x$  con  $y$ .  $\square$

**Corolario 0.9.1.** Cualquier conjunto  $A$  de  $\mathbb{R}^n$  convexo es arcoconexo. Por ejemplo, las bolas abiertas o las bolas cerradas de  $\mathbb{R}^n$ .

**Corolario 0.9.2.** En  $\mathbb{R}$  coinciden los conjuntos conexos y arcoconexos (son solo los intervalos).

**Teorema 0.10.** La imagen mediante una aplicación continua de un arcoconexo es un arcoconexo. En particular, ser arcoconexo es una propiedad topológica, es decir, se conserva por homeomorfismos.

*Demostración.* Dados  $x, y \in f(X)$ , entonces existen  $x_0, y_0 \in X$  tal que  $f(x_0) = x$  y  $f(y_0) = y$ . Por ser  $X$  arcoconexo, entonces existe un arco  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$  con  $\alpha(0) = x_0$  y  $\alpha(1) = y_0$ . Entonces tenemos que  $f \circ \alpha : [0, 1] \rightarrow f(X)$  es continua y  $(f \circ \alpha)(0) = f(x_0) = x$  y  $(f \circ \alpha)(1) = f(y_0) = y$  y tenemos demostrado el resultado que buscábamos.  $\square$

**Teorema 0.11.** Sean  $X$  un e.t. y  $\{A_i\}_{i \in I}$  una familia de arcoconexos de  $X$ . Si  $\bigcap_{i \in I} A_i \neq \emptyset$ , entonces  $\bigcup_{i \in I} A_i$  es arcoconexo.

*Observación.* Hay resultados de conexión que no son ciertos para arcoconexión. Por ejemplo, si en un e.t.  $X$  se tiene que  $A \subseteq X$  es arcoconexo podría ocurrir que si  $A \subseteq B \subseteq \bar{A}$ , se diera que  $B$  no sea arcoconexo (como en el ejemplo anterior).

**Ejemplo.** Veamos que  $\mathbb{S}^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : |x| = 1\}$  es arcoconexo. Podemos hacerlo sabiendo que  $\mathbb{S}^n \setminus \{N\}$ , con  $N = (0, \dots, 0, 1)$  es homeomorfo a  $\mathbb{R}^n$  que es arcoconexo por lo que  $\mathbb{S}^n \setminus \{N\}$  es arcoconexo. Análogamente,  $\mathbb{S}^n \setminus \{S\}$  con  $S = (0, \dots, 0, -1)$  es arcoconexo y podemos escribir

$$\mathbb{S}^n = (\mathbb{S}^n \setminus \{N\}) \cup (\mathbb{S}^n \setminus \{S\})$$

por lo que  $\mathbb{S}^n$  es unión de arcoconexos con puntos en común, luego es arcoconexo.

**Teorema 0.12.** Sean  $X, Y$  e.t., entonces  $X \times Y$  es arcoconexo (con la topología producto) si y solo si  $X$  e  $Y$  son arcoconexos.

**Teorema 0.13.** Dado un e.t.  $X$ , se tiene que  $X$  es arcoconexo si y solo si  $X$  es conexo y todo punto  $x \in X$  tiene un entorno suyo arcoconexo.

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Hemos visto que si  $X$  es arcoconexo, entonces  $X$  es conexo. Además,  $X$  es entorno de cualquier punto suyo luego todo punto tiene un entorno conexo.

$\Leftarrow$ ) Elegimos un  $x \in X$  fijo y definimos  $A = \{y \in X : \exists \alpha_y \text{ arco uniendo } x \text{ con } y\}$

Como  $x \in A$  tenemos que  $A \neq \emptyset$ . Si probamos que  $A$  es abierto y cerrado, entonces como  $X$  es conexo tendremos que  $A = X$ , es decir podremos unir  $x$  con cualquier otro punto  $y \in X$ . Esto se deja como ejercicio para el lector.

□