

# Topología II

Foto: José Juan Castro

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

se crean derivados de estos datos originales y no para fines comerciales.

# Topología II

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

Granada, 2025



# Índice general



# 1. Relaciones de Ejercicios

## 1.1. Conexión por arcos

**Ejercicio 1.1.1.** Muestra que cualquier esfera de  $\mathbb{R}^n$ ,  $n \geq 2$  es arcoconexa con la topología usual.

Es decir, queremos ver que  $\mathbb{S}^n$  es arcoconexa para  $n \geq 1$ .  
(notemos que  $\mathbb{S}^0 = \{x \in \mathbb{R} : \|x\| = 1\} = \{-1, 1\}$  no es un conjunto arcoconexo).

Para ello, sea  $n \geq 2$ , sabemos que  $\mathbb{S}^n \setminus \{p\}$  (con  $p \in \mathbb{S}^n$ ) es homeomorfa a  $\mathbb{R}^{n-1}$ , que es un conjunto arcoconexo por ser convexo (es un espacio vectorial). Como la arcoconexión es una propiedad topológica, esta se conserva por homeomorfismo, luego  $\mathbb{S}^n \setminus \{p\}$  es un conjunto arcoconexo,  $\forall p \in \mathbb{S}^n$ .

Tomando  $N = (0, \dots, 0, 1)$ ,  $S = (0, \dots, 0, -1) \in \mathbb{S}^n$ , podemos ver  $\mathbb{S}^n$  como unión de dos conjuntos arcoconexos:

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

no disjuntos:

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

Por lo que  $\mathbb{S}^n$  es un conjunto arcoconexo,  $\forall n \geq 2$ .

**Ejercicio 1.1.2.** Demuestra que si  $\{A_i\}_{i \in I}$  es una familia de arcoconexos de  $X$  tales que todos intersecan a uno de ellos, es decir,

$$A_i \cap A_{i_0} \neq \emptyset, \quad \forall i \in I,$$

entonces  $\bigcup_{i \in I} A_i$  es arcoconexo.

Sean  $x, y \in \bigcup_{i \in I} A_i$ , entonces existen  $i, j \in I$  de forma que  $x \in A_i$  y  $y \in A_j$ . Como  $A_i \cap A_{i_0}, A_j \cap A_{i_0} \neq \emptyset$ , podemos tomar  $a \in A_i \cap A_{i_0}$  y  $b \in A_j \cap A_{i_0}$ .

- $A_i$  es un conjunto arcoconexo con  $x, a \in A_i$ , por lo que existe un camino,  $\alpha$ , que une  $x$  con  $a$ .
- $A_j$  también es un conjunto arcoconexo con  $y, b \in A_j$ , por lo que existe un camino,  $\beta$ , que une  $y$  con  $b$ .
- Además,  $A_{i_0}$  es un conjunto arcoconexo con  $a, b \in A_{i_0}$ , por lo que existe un tercer camino,  $\gamma$ , que une  $a$  con  $b$ .

De esta forma, podemos tomar:

$$\sigma = \alpha * (\gamma * \tilde{\beta})$$

Que es un camino que une  $x$  con  $y$ . Como  $x$  e  $y$  eran arbitrarios, podemos unir cualesquiera dos puntos de  $\bigcup_{i \in I} A_i$ , por lo que dicho conjunto es arcoconexo.

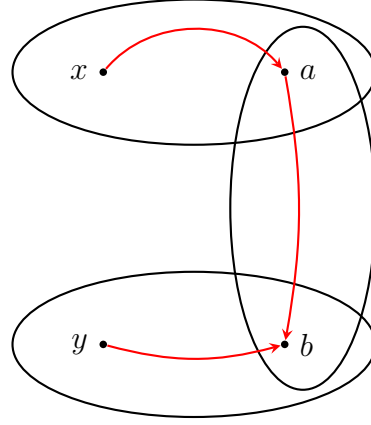


Figura 1.1: Forma de unir dos puntos cualesquiera.

**Ejercicio 1.1.3.** Sea  $X$  un conjunto,  $x_0 \in X$ , y consideramos la topología (del punto incluido) dada por

$$T = \{U \subset X : x_0 \in U\} \cup \{\emptyset\}$$

¿Es  $(X, T)$  arcoconexo?

Sí: sea  $x \in X$ , veamos que la aplicación  $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$  dada por

$$\alpha(t) = \begin{cases} x & \text{si } t \in [0, 1/2] \\ x_0 & \text{si } t \in ]1/2, 1] \end{cases} \quad \forall t \in [0, 1]$$

es continua. Sea  $U \in T$ :

- Si  $U = \emptyset$ , entonces  $\alpha^{-1}(U) = \emptyset \in \mathcal{T}_u|_{[0,1]}$ .
- Si  $x_0 \in U$  y  $x \notin U$ , entonces  $\alpha^{-1}(U) = ]1/2, 1] \in \mathcal{T}_u|_{[0,1]}$ .
- Si  $x_0, x \in U$ , entonces  $\alpha^{-1}(U) = [0, 1] \in \mathcal{T}_u|_{[0,1]}$ .

Como la preimagen de cualquier conjunto abierto es abierta, tenemos que  $\alpha$  es continua, luego es un arco que une  $x$  con  $x_0$ .

Ahora, si  $x, y \in X$ , tenemos que existen  $\alpha, \beta : [0, 1] \rightarrow X$  de forma que  $\alpha$  une  $x$  con  $x_0$  y  $\beta$  une  $y$  con  $x_0$ ; por lo que  $\alpha * \tilde{\beta}$  es un arco que une  $x$  con  $y$ . Como  $x$  e  $y$  eran arbitrarios, concluimos que  $X$  es arcoconexo.



**Ejercicio 1.1.4.** Demuestra que en  $\mathbb{R}^n$  con la topología usual, todo abierto conexo es arcoconexo. ¿Es cierto que todo cerrado conexo de  $\mathbb{R}^n$  es arcoconexo?

En teoría vimos que:

$$\text{Un conjunto es arcoconexo} \iff \begin{cases} \text{Es conexo} \\ \text{Todo punto admite un entorno arcoconexo} \end{cases}$$

Sea  $U$  un abierto conexo de  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{T}_u)$ , falta ver que todo punto suyo admite un entorno arcoconexo en la topología inducida en  $U$  para ver que  $U$  es arcoconexo. Para ello, sea  $x \in U$ , como  $U$  es abierto existe  $r \in \mathbb{R}^+$  de forma que  $B(x, r) \subset U$ .  $B(x, r)$  es un conjunto arcoconexo por ser convexo, luego es un entorno arcoconexo de  $x$  en  $U$ . Como  $x$  era un punto arbitrario de  $U$ , todo punto suyo admite un entorno arcoconexo, y como  $U$  era conexo, tenemos que  $U$  es arcoconexo.

Ahora, no es cierto que todo cerrado conexo de  $\mathbb{R}^n$  es arcoconexo, ya que si consideramos  $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$  dada por:

$$f(x) = \sin\left(\frac{1}{x}\right) \quad \forall x \in \mathbb{R}^+$$

Tenemos que

$$C = \overline{Gr(f)} = \overline{\{(x, f(x)) : x \in \mathbb{R}^+\}} = Gr(f) \cup (\{0\} \times [-1, 1])$$

es un conjunto cerrado y conexo (se vio en Topología I) pero que no es arcoconexo, puede probarse por un razonamiento similar a un ejemplo visto en teoría.

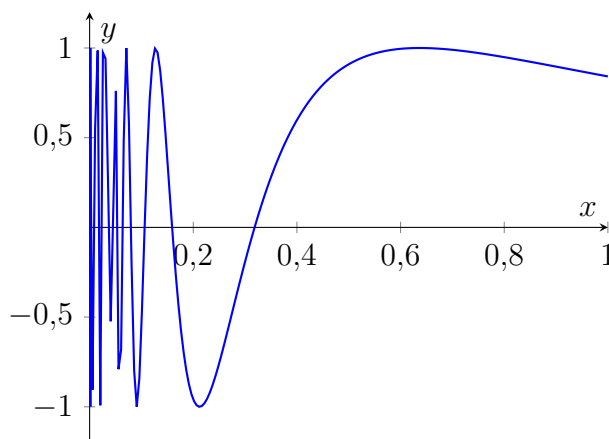


Figura 1.2: Dibujo de la adherencia de la gráfica de  $f(x)$ .

**Ejercicio 1.1.5.** Prueba que la componente arcoconexa de un punto  $x_0$  está contenida en la componente conexa de  $x_0$ .

Sea  $(X, T)$  un espacio topológico,  $x_0 \in X$  y  $C$  la componente arcoconexa de  $x_0$  en  $X$ , en particular tenemos que  $C$  es un conjunto arcoconexo, luego es conexo, por lo que está contenida en la componente conexa de  $x$ , al ser esta el mayor conjunto conexo que contiene a  $x$ .

**Ejercicio 1.1.6.** En  $\mathbb{R}$  con la topología de Sorgenfrey, esto es, la topología que tiene como base

$$\mathcal{B}_S = \{[a, b) \subset \mathbb{R} : a < b\},$$

determina sus componentes arcoconexas.

En Topología I vimos que las componentes conexas de la topología de Sorgenfrey eran los conjuntos de puntos unitarios  $\{x\}$ , ya que si tenemos un conjunto  $A \subset \mathbb{R}$  con al menos dos puntos distintos  $x$  e  $y$  (suponemos  $x < y$ ), entonces en la topología inducida en  $A$  podemos considerar los abiertos:

$$U = [-\infty, y) \cap A, \quad V = [y, +\infty) \cap A$$

de forma que  $U, V \neq \emptyset$ ,  $U \cup V = A$  y  $U \cap V = \emptyset$ , por lo que  $A$  (cualquier conjunto con al menos dos puntos distintos) es desconexo, luego las componentes conexas han de ser los conjuntos unitarios, ya que los conjuntos unitarios son conexos en cualquier topología.

Como las componentes arcoconexas se encuentran contenidas en las componentes conexas, no queda más salida que las componentes arcoconexas de la topología de Sorgenfrey sean los conjuntos unitarios.

**Ejercicio 1.1.7.** Sea  $f : X \rightarrow Y$  un homeomorfismo entre espacios topológicos. Demuestra que  $A \subset X$  es una componente arcoconexa de  $X$  si y solo si  $f(A)$  es una componente arcoconexa de  $Y$ . Deduce que el número de componentes arcoconexas es invariante por homeomorfismos.

Sea  $A \subset X$  una componente arcoconexa de  $X$ , veamos que  $f(A)$  es una componente arcoconexa de  $Y$ . Para ello, por reducción al absurdo, si  $f(A)$  no fuera una componente arcoconexa de  $Y$  podría ser por dos razones:

- $f(A)$  no es un conjunto arcoconexo, algo que llevaría a una contradicción, ya que se vio que la imagen por una función continua de un conjunto arcoconexo era arcoconexa.
- Porque existe  $B \subset Y$  un conjunto arcoconexo distinto de  $f(A)$  de forma que  $f(A) \subset B \subset Y$ . En dicho caso, si aplicamos  $f^{-1}$  en la anterior inclusión tenemos que:

$$f^{-1}(f(A)) = A \subset f^{-1}(B) \subset X$$

Por lo que tenemos  $f^{-1}(B)$ , un conjunto arcoconexo<sup>1</sup> distinto de  $A$  que contiene a  $A$ , luego  $A$  no era una componentes arcoconexa de  $X$ , contradicción.

En definitiva, si  $A \subset X$  es una componente arcoconexa entonces  $f(A)$  también lo es de  $Y$ . Ahora, si  $f(A)$  es una componente arcoconexa de  $Y$ , basta aplicar que  $f^{-1}$  también es un homeomorfismo para concluir que  $f^{-1}(f(A)) = A$  es una componente arcoconexa de  $X$ .

Sea  $Z$  un espacio topológico, notaremos en este ejercicio:

$$\Gamma_Z = \{U \subset Z : U \text{ es una componente arcoconexa de } Z\}$$

---

<sup>1</sup>por ser imagen por una función continua de un conjunto arcoconexo.

Recuperando el homeomorfismo  $f : X \rightarrow Y$ , definimos

$$\begin{aligned} \Phi : \Gamma_X &\longrightarrow \Gamma_Y \\ U &\longmapsto f(U) \end{aligned}$$

- $\Phi$  está bien definida (es decir,  $f(U) \in \Gamma_Y$  para  $U \in \Gamma_X$ ), ya que hemos visto que la imagen de una componente arcoconexa de  $X$  es una componente arcoconexa de  $Y$ .
- $\Phi$  es inyectiva, ya que si  $U, V \in \Gamma_X$  con  $f(U) = f(V)$ , entonces por ser  $f$  inyectiva tenemos que  $U = V$ .
- $\Phi$  es sobreyectiva, ya que si  $W \in \Gamma_Y$ , entonces  $f^{-1}(W) \in \Gamma_X$ , con:

$$\Phi(f^{-1}(W)) = f(f^{-1}(W)) = W$$

Por ser  $\Phi$  biyectiva concluimos que  $|\Gamma_X| = |\Gamma_Y|$ ; es decir, el número de componentes arcoconexas es invariante por homeomorfismos.

**Ejercicio 1.1.8.** En  $X = \mathbb{R} \times \{0, 1\}$  se considera la topología que tiene por base

$$\mathcal{B} = \{]a, b[ \times \{0, 1\} : a < b\}.$$

Demuestra que  $X$  es arcoconexo. ¿Es  $X$  homeomorfo a  $\mathbb{R}$  con la topología usual?

Sean  $\alpha = (x, a), \beta = (y, b) \in X$ , vamos a tratar de crear un arco que una  $\alpha$  con  $\beta$ :

- Si  $a = b$ , entonces  $\gamma : [0, 1] \rightarrow X$  dada por:

$$\gamma(t) = ((1-t)x + ty, a) \quad \forall t \in [0, 1]$$

Es una aplicación continua, ya que si tomamos  $B = ]a, b[ \times \{0, 1\} \in \mathcal{B}$ , tenemos:

$$\gamma^{-1}(B) = \gamma^{-1}(]a, b[ \times \{0\}) \text{ abierto de } [0, 1]$$

Ya que el conjunto  $]a, b[ \times \{0\}$  es un abierto para la topología usual y  $\alpha$  es una aplicación continua para la topología usual.

- Si  $\alpha = (0, 0)$  y  $\beta = (0, 1)$ , entonces si tomamos  $\gamma : [0, 1] \rightarrow X$  dada por:

$$\gamma(t) = \begin{cases} \alpha & \text{si } 0 \leq t \leq 1/2 \\ \beta & \text{si } 1/2 < t \leq 1 \end{cases}$$

tenemos que  $\gamma$  es continua, ya que si  $B = ]a, b[ \times \{0, 1\} \in \mathcal{B}$ , tenemos que:

$$\gamma^{-1}(B) = \begin{cases} \emptyset & \text{si } 0 \notin ]a, b[ \\ [0, 1] & \text{si } 0 \in ]a, b[ \end{cases}$$

- Una vez discutidos dichos casos, suponemos ahora que  $\alpha = (x, 0)$  y  $\beta = (y, 1)$  (en caso contrario, sustituimos los papeles de  $\alpha$  y  $\beta$ ), en cuyo caso:
  - Sabemos de la existencia de un arco  $\gamma$  que une  $\alpha$  con  $(0, 0)$ .

- Sabemos de la existencia de un arco  $\tau$  que une  $(0, 0)$  con  $(0, 1)$ .
- Sabemos de la existencia de un arco  $\pi$  que une  $\beta$  con  $(0, 1)$ .

Si consideramos el arco  $\gamma * (\tau * \tilde{\pi})$  obtenemos un arco que une  $\alpha$  con  $\beta$ .

Por tanto,  $X$  es arcoconexo, ya que somos capaces de unir cualesquiera dos puntos distintos de  $X$  por un arco.

Ahora, para responder a la pregunta de si  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$  es homeomorfo a  $X$ , la respuesta es que no, y tenemos dos formas de justificar la respuesta:

**Opción 1.** Sabemos que  $(\mathbb{R}, \mathcal{T}_u)$  es  $T_2$  por ser un espacio topológico metrizable, mientras que podemos probar que  $X$  no es  $T_2$ , ya que no existen ningún par de abiertos disjuntos uno conteniendo a  $(0, 0)$  y otro conteniendo a  $(0, 1)$ , puesto que si  $U$  es un abierto de  $X$  que contiene a  $(0, 0)$ , entonces como  $\mathcal{B}$  es una base, existen  $a, b \in \mathbb{R}$  de forma que:

$$(0, 0) \in ]a, b[ \times \{0, 1\} \subset U$$

Sin embargo, tendríamos entonces que  $(0, 1) \in ]a, b[ \times \{0, 1\}$ , de donde  $(0, 1) \in U$ , por lo que  $X$  no es  $T_2$  y como ser  $T_2$  es una propiedad topológica, dichos espacios no pueden ser homeomorfos.

**Opción 2.** Otra forma sería suponer que son homeomorfos, con lo que existe un homeomorfismo  $f : \mathbb{R} \rightarrow X$ . Sea  $p \in \mathbb{R}$ , resulta entonces que  $\mathbb{R} \setminus \{p\}$  es homeomorfo a  $X \setminus \{(p, 0)\}$ , pero:

- $\mathbb{R} \setminus \{p\}$  no es arcoconexo.
- $X \setminus \{(p, 0)\}$  sí es arcoconexo, ya que podemos hacer que cualquier curva “salte” a  $(p, 1)$  sin perder su continuidad, con lo que podemos seguir conectando dos puntos cualesquiera.

**Ejercicio 1.1.9.** En  $\mathbb{R}^3$  con la topología usual, calcula las componentes arcoconexas de

$$X = \{x, y, z\} \in \mathbb{R}^3 : xyz = 1\}$$

Notemos que como  $xyz = 1$ , ninguno de ellos puede ser igual a 0, por lo que:

$$X = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : z = \frac{1}{xy}, \quad xy \neq 0 \right\}$$

Si tomamos:

$$\Gamma = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : xy \neq 0\} = \mathbb{R}^* \times \mathbb{R}^*$$

y definimos  $f : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$  dada por:

$$f(x, y) = \frac{1}{xy} \quad \forall (x, y) \in \Gamma$$

Tenemos que  $X = Gr(f)$ . Por tanto, definiendo  $h : \Gamma \rightarrow X$  por:

$$h(x, y) = (x, y, f(x, y)) \quad \forall (x, y) \in \Gamma$$

Obtenemos (como vimos en Topología I) un homeomorfismo entre  $\Gamma$  y  $X$ . Como  $\Gamma$  tiene 4 componentes arcoconexas:

$$\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+, \quad \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^-, \quad \mathbb{R}^- \times \mathbb{R}^-, \quad \mathbb{R}^- \times \mathbb{R}^+$$

y las componentes arcoconexas se convierten por homeomorfismos tal y como acabamos de ver en el ejercicio 7, tenemos que:

$$h(\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+), \quad h(\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^-), \quad h(\mathbb{R}^- \times \mathbb{R}^-), \quad h(\mathbb{R}^- \times \mathbb{R}^+)$$

son las componentes arcoconexas de  $X$ .

**Ejercicio 1.1.10.** En  $\mathbb{R}^2$  con la topología usual consideremos las rectas horizontales  $A_n = \mathbb{R} \times \{1/n\}$ ,  $B_n = \mathbb{R} \times \{-1/n\}$  y el eje de ordenadas menos el origen, esto es,  $C = \{0\} \times (\mathbb{R} \setminus \{0\})$ . Calcula las componentes conexas y arcoconexas de

$$X = \left( \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) \cup \left( \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n \right) \cup C \cup \{(1, 0)\}.$$

## 1.2. El grupo fundamental

**Ejercicio 1.2.1.** Prueba que en un espacio topológico simplemente conexo  $X$ , dos arcos cualesquiera  $\alpha, \beta \in \Omega(X, x, y)$  son homotópicos por arcos.

**Ejercicio 1.2.2.** Sean  $X$  un subconjunto de  $\mathbb{R}^n$  y  $f : X \rightarrow Y$  una aplicación. Demuestra que si  $f$  se puede extender a una aplicación continua  $F : \mathbb{R}^n \rightarrow Y$ , entonces  $h_*$  es el homomorfismo trivial, es decir, el homomorfismo que lleva todo elemento en el neutro.

**Ejercicio 1.2.3.** Se dice que un grupo  $G$  con operación  $\cdot$  es un grupo topológico si  $G$  tiene una topología de forma que las aplicaciones producto e inversión

$$\begin{aligned} : G \times G &\longrightarrow G \\ (x, y) &\longmapsto x \cdot y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} : G &\longrightarrow G \\ x &\longmapsto x^{-1} \end{aligned}$$

son continuas. Sea  $e$  el elemento neutro en  $G$ .

- Dados  $\alpha, \beta \in \Omega(G, e)$ , se define  $\alpha \cdot \beta : [0, 1] \rightarrow G$  como  $(\alpha \cdot \beta)(t) = \alpha(t) \cdot \beta(t)$ . Demuestra que  $\alpha \cdot \beta \in \Omega(G, e)$ .
- Comprueba que  $(\alpha * \varepsilon_e) \cdot (\varepsilon_e * \beta) = \alpha * \beta$  para cualquiera  $\alpha, \beta \in \Omega(G, e)$ .
- Sean  $[\alpha], [\beta] \in \pi_1(G, e)$ . Prueba que la operación  $[\alpha] \cdot [\beta] = [\alpha \cdot \beta]$  está bien definida.
- Muestra que  $[\alpha] \cdot [\beta] = [\alpha] * [\beta]$ , para cada  $[\alpha], [\beta] \in \pi_1(G, e)$ .
- Demuestra que  $\pi_1(G, e)$  es abeliano.

**Ejercicio 1.2.4.** Sean  $X$  un espacio topológico y  $f, g : X \rightarrow \mathbb{S}^n$  aplicaciones continuas con  $g(x) \neq -f(x)$  para cada  $x \in X$ . Prueba que  $f$  y  $g$  son homotópicas. Deduce que si  $f : \mathbb{S}^n \rightarrow \mathbb{S}^n$  es continua y carece de puntos fijos, entonces  $f$  es homotópica a  $-Id_{\mathbb{S}^n}$ .

**Ejercicio 1.2.5.** Sea  $p : R \rightarrow B$  una aplicación recubridora y  $b \in B$ . Demuestra que el subespacio topológico  $p^{-1}(\{b\}) \subset R$  tiene la topología discreta.

**Ejercicio 1.2.6.** Demuestra que toda aplicación recubridora es una aplicación abierta.

**Ejercicio 1.2.7.** Sea  $p : R \rightarrow B$  una aplicación recubridora, con  $B$  conexo. Demuestra que si  $p^{-1}(b_0)$  tiene  $k$  elementos para algún  $b_0 \in B$ , entonces  $p^{-1}(b)$  tiene  $k$  elementos para todo  $b \in B$ . En tal caso, se dice que  $R$  es un recubridor de  $k$  hojas de  $B$ .

**Ejercicio 1.2.8.** Sean  $p_1 : X \rightarrow Y$  y  $p_2 : Y \rightarrow Z$  dos aplicaciones recubridoras. Prueba que si  $p_2^{-1}(z)$  es finito para todo  $z \in Z$ , entonces  $p_2 \circ p_1 : X \rightarrow Z$  es una aplicación recubridora.

**Ejercicio 1.2.9.** Consideremos una aplicación recubridora  $p : R \rightarrow B$  y la relación de equivalencia  $\mathcal{R}_p$  en  $R$  dada por

$$r_1 \mathcal{R}_p r_2 \iff p(r_1) = p(r_2)$$

Demuestra que  $R/\mathcal{R}_p$  es homeomorfo a  $B$ :

**Ejercicio 1.2.10.** Sea  $p : R \rightarrow B$  una aplicación recubridora, con  $R$  arcoconexo y  $B$  simplemente conexo. Prueba que  $p$  es un homeomorfismo.

**Ejercicio 1.2.11.** Dado un espacio topológico  $Y$ , prueba que estas afirmaciones son equivalentes:

- a)  $Y$  es contráctil.
- b) Para cualesquiera  $f, g : X \rightarrow Y$  continuas se tiene que  $f$  y  $g$  son homotópicas.
- c) Cada aplicación continua  $f : X \rightarrow Y$  es nulhomótota.
- d) La identidad  $Id_Y$  es nulhomótota.
- e) Cada conjunto  $\{y_0\}$  con  $y_0 \in Y$  es un retracto de deformación de  $Y$ .

**Ejercicio 1.2.12.** Prueba que  $X = ([0, 1] \times \{0\}) \cup ((K \cup \{0\}) \times [0, 1]) \subset \mathbb{R}^2$  es contráctil, donde  $K = \{\frac{1}{m} : m \in \mathbb{N}\}$ .

**Ejercicio 1.2.13.** Sea  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$  una función continua. Definimos el conjunto:

$$S_f = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + y^2 = (f(z))^2\}$$

- a) Estudia el conjunto  $S_f \cap \{z = z_0\}$  con  $z_0 \in \mathbb{R}$ .
- b) Demuestra que cualesquiera dos conjuntos  $S_f$  son homeomorfos entre sí.
- c) Calcula el grupo fundamental de  $S_f$ .

**Ejercicio 1.2.14.** Prueba que  $\mathbb{R} \times [0, +\infty[$  no es homeomorfo a  $\mathbb{R}^2$ . ¿Son del mismo tipo de homotopía?

**Ejercicio 1.2.15.** Sea  $S$  un subespacio afín de  $\mathbb{R}^n$  de dimensión  $k \leq n - 2$ . Calcula  $\pi_1(\mathbb{R}^n \setminus S)$ .

**Ejercicio 1.2.16.** Prueba que si  $X$  es de Hausdorff y  $A \subseteq X$  es un retracto de  $X$ , entonces  $A$  es cerrado en  $X$ . Deduce que una bola abierta en  $\mathbb{R}^n$  no es un retracto de  $\mathbb{R}^n$ . ¿Lo es una bola cerrada?

**Ejercicio 1.2.17.** En este ejercicio demostraremos que *un abierto de  $\mathbb{R}^2$  no puede ser homeomorfo a un abierto de  $\mathbb{R}^n$  si  $n \geq 3$* . Supongamos que  $f : U \rightarrow V$  es un homeomorfismo entre abiertos no vacíos  $U \subset \mathbb{R}^n$  y  $V \subset \mathbb{R}^2$  con  $n \geq 3$ .

- a) Prueba que existen bolas abiertas  $B_1 \subset U$  y  $B_2, B'_2 \subset V$  (estas últimas con el mismo centro  $y_0 \in \mathbb{R}^2$ ) tales que  $\overline{B'_2} \subset f(\overline{B_1}) \subset \overline{B_2}$ .
- b) Si  $i : \overline{B'_2} \setminus \{y_0\} \rightarrow \overline{B_2} \setminus \{y_0\}$  es la inclusión, deduce de a) que el homomorfismo inducido en cualquier punto  $i_*$  es trivial.

- c) Prueba que  $\overline{B'_2} \setminus \{y_0\}$  es un retracto de deformación de  $\overline{B_2} \setminus \{y_0\}$ . Concluye que  $i_*$  es un isomorfismo no trivial, lo que contradice b).

**Ejercicio 1.2.18.** Demuestra que el sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} x - \arctan(x^2 - y^3) = 2 \\ \cos(x) + \sin(xy^3) + e^x + e^{y^2} + \frac{1}{y} = -5 \end{cases}$$

tiene al menos una solución en  $\mathbb{R}^2$ .

**Ejercicio 1.2.19.** Sean  $M$  una matriz cuadrada real de orden 3 por 3 cuyas entradas son números reales positivos y  $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  la aplicación lineal  $f(v) = Mv$ . Demuéstrese que:

- El conjunto  $A = \{(x, y, z) \in \mathbb{S}^2 : x_1, x_2, x_3 \geq 0\}$  es homeomorfo al disco cerrado  $\overline{\mathbb{D}}$ .
- La aplicación  $g : A \rightarrow \mathbb{S}^2$  dada por  $g(v) = \frac{f(v)}{|f(v)|}$  está bien definida y  $g(A) \subset A$ .
- $f$  tiene un valor propio real y positivo.

**Ejercicio 1.2.20.** Teorema de Lusternik-Schnirelmann. Demuestra que si  $\mathbb{S}^2$  es la unión de tres subconjuntos cerrados  $C_1, C_2, C_3$ , entonces alguno de ellos contiene dos puntos antipodas. Para ello prueba que la función  $f : \mathbb{S}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  dada por

$$f(x) = (\text{dist}(x, C_1), \text{dist}(x, C_2))$$

tiene un punto  $x_0 \in \mathbb{S}^2$  tal que  $f(x_0) = f(-x_0)$ , donde  $\text{dist}(\cdot, \cdot)$  denota la función distancia en  $\mathbb{R}^3$ .

**Ejercicio 1.2.21.** Calcula  $\pi_1(X)$  en los siguientes casos:

- $X = \mathbb{S}^2 \cup (\mathbb{D} \times \{0\})$ .
- $X = (\mathbb{S}^1 \times [-1, 1]) \cup (\mathbb{D} \times \{-1, 1\})$ .
- $X = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + y^2 = (z + 1)^2, -1 \leq z \leq 0\} \cup (\mathbb{S}^2 \cap \{z \geq 0\})$ .
- $X = S_1 \cup S_2 \cup L$ , donde  $S_1, S_2$  son cerrados disjuntos simplemente conexos de  $\mathbb{R}^n$  y  $L \subset \mathbb{R}^n$  es un segmento tal que  $L \cap S_i = \{x_i\}$ ,  $i = 1, 2$ .
- $X \subset \mathbb{R}^3$  es la unión de una circunferencia y de una esfera que se tocan en un único punto.
- $X = \mathbb{S}^2 \cup \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : y^2 + (z - 2)^2 = 1\} \cup \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : y^2 + (z + 2)^2 = 1\}$ .
- $X = S_1 \cup (\mathbb{S}^1 \times \{0\}) \cup S_2$ , donde  $S_1$  y  $S_2$  son, respectivamente, las esferas de radio 1 centradas en el  $(0, -2, 0)$  y en el  $(0, 2, 0)$ .
- $X \subset \mathbb{R}^2$  es la unión de las tres circunferencias de radio 1 centradas en los puntos  $(-2, 0)$ ,  $(0, 0)$  y  $(2, 0)$ .



- i)  $X = \mathbb{S}^1 \cup [(-1, 0), (1, 0)]$ .

**Ejercicio 1.2.22.** Razona si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:

- a) Sean  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \in \Omega(X, x_0)$  con  $[\alpha_1 * \beta_1] = [\alpha_2 * \beta_2]$ . Entonces  $[\alpha_1] = [\alpha_2]$  y  $[\beta_1] = [\beta_2]$ .
- b) Sean  $f : A \rightarrow Y$  una aplicación continua con  $A \subset X$  y  $X$  simplemente conexo. Si existe  $F : X \rightarrow Y$  continua con  $F|_A = f$ , entonces  $f_*$  es trivial.
- c) Si  $f : X \rightarrow Y$  es continua y nulhomótopa, entonces  $f_*$  es trivial.
- d) Si  $f : X \rightarrow \mathbb{S}^n$  es continua y no sobreyectiva, entonces es nulhomótopa.
- e) Si  $X$  es simplemente conexo y  $A \subset X$  un retracto de  $X$ , entonces  $A$  es simplemente conexo.
- f) Si  $f : X \rightarrow Y$  es continua e inyectiva con  $f(x_0) = y_0$  entonces  $f_* : \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, y_0)$  es un monomorfismo.
- g) Sea  $f : X \rightarrow Y$  una equivalencia homotópica y  $A \subset X$ . La restricción  $f|_A : A \rightarrow f(A)$  es una equivalencia homotópica.
- h)  $\mathbb{S}^1$  no tiene ningún retracto de deformación  $A \neq \mathbb{S}^1$ .
- i) Existe un homeomorfismo de  $\mathbb{R}^2$  que intercambia las componentes conexas de  $\mathbb{R}^2 \setminus \mathbb{S}^1$ .
- j) Si  $A$  es un retracto del disco unidad cerrado de  $\mathbb{R}^2$ , entonces toda aplicación continua  $f : A \rightarrow A$  tiene al menos un punto fijo.