



**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID**

**ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO**

**Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Impacto de las Medidas de Política  
Energética y Climática sobre la Aviación**

**Irene C. Puch San Segundo**

**Curso 2022-2023**



Septiembre 2023

Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

**Título:** Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

**Autor:** Irene C. Puch San Segundo

**Tutor:** Álvaro Rodríguez Sanz

**Titulación:** Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

**Curso:** 2022-2023



Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

## RESUMEN

Este trabajo se enfoca en la aviación y su impacto ambiental. Desde los organismos internacionales se han establecido políticas climáticas y energéticas que pronto tendrán impacto en la industria. El análisis se centra en la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la eficiencia en la aviación comercial en España.

Se estudia la estructura del tráfico aéreo en España como un paso fundamental para comprender el impacto climático. Se analizan diversas variables relevantes en relación con los datos de consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> utilizando análisis de regresión. Los resultados de estos análisis respaldan una discusión crítica sobre las políticas energéticas y climáticas propuestas.

Se utiliza la metodología de análisis de la gestión de rutas aéreas para abordar estas cuestiones. Esto implica examinar la evolución de la estructura del transporte aéreo en España y después tener en cuenta los consumos energéticos de estas rutas.

Entre los resultados de interés destacan el crecimiento sostenido en el número de pasajeros, con un aumento anual promedio del 4%. Además, se observa una mejora significativa en la eficiencia de los vuelos en España durante el período, impulsada por renovaciones de flota y mejoras en la eficiencia.

El objetivo principal del sector es lograr emisiones netas cero para 2050. Se destacan medidas como el aumento del uso de combustibles de aviación sostenibles (SAF), la promoción de *offsets* y la investigación en tecnologías como el hidrógeno verde.

Las iniciativas de modernización en la gestión del tráfico aéreo también son cruciales para reducir las emisiones. La optimización del espacio aéreo y la implementación de tecnologías como PBN y *free route* pueden conducir a rutas más directas y operaciones más eficientes, lo que resulta en ahorro de combustible y menos emisiones de CO<sub>2</sub>.



Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

# Índice

RESUMEN .....	4
Índice.....	6
Índice de figuras .....	8
Índice de tablas .....	10
1. Introducción .....	11
2. Estado del arte.....	16
3. Evidencia y marco para el análisis.....	19
3.1 Generalidades.....	19
3.2 Marco para el análisis y fuentes de los datos.....	23
3.3 Descripción de los datos .....	24
4. Metodología .....	27
4.1 Definición de variables .....	28
4.1.1 Reescalado y resumen resultados.....	32
4.2 Cálculo de la distancia .....	34
5. Análisis de los datos .....	35
5.1 Estructura del transporte aéreo.....	35
5.1.1 Aeropuertos .....	37
5.1.2 Rutas .....	40
5.1.3 Tipos de aeronave y de propulsión.....	45
5.2 Combustible y CO <sub>2</sub> .....	49
5.3 Pasajeros y actividad económica .....	52

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

6. Energía y emisiones .....	53
7. Propuestas de política energética y posibles impactos .....	58
8. Conclusiones y Trabajo Futuro .....	60
8.1 Interacción entre elementos técnicos y económicos .....	63
9. ANEXOS.....	64
Anexo 1: Otros gráficos.....	64
REFERENCIAS.....	68

# Índice de figuras

FIGURA 3.1 EVOLUCIÓN DEL PIB REAL PER CÁPITA EN ESPAÑA Y LA UE DE 2001 A 2022..	21
FIGURA 3.2 EVOLUCIÓN DEL PIB REAL PER CÁPITA, LAS EMISIONES DE CO2 Y EL NÚMERO DE PASAJEROS EN AVIÓN EN ESPAÑA DE 2003 A 2019. ....	22
FIGURA 4.1 DISTANCIA ENTRE DOS PUNTOS SOBRE UN CÍRCULO MÁXIMO DE LA TIERRA ....	34
FIGURA 5.1 EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TOTAL DE VUELOS EN ESPAÑA POR TIPO DE CONEXIÓN. ....	35
FIGURA 5.2 EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS VUELOS EN ESPAÑA POR TIPO Y RANGO DE DISTANCIA. ....	36
FIGURA 5.3 EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE VUELOS EN ESPAÑA POR RANGO DE DISTANCIA..	37
FIGURA 5.4 MAPA AEROPUERTOS EN ESPAÑA TENIDOS EN CUENTA PARA ESTE ESTUDIO. .	38
FIGURA 5.5 EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PASAJEROS EN ESPAÑA POR AEROPUERTOS. ....	39
FIGURA 5.6 EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS VUELOS EN ESPAÑA POR AEROPUERTOS. ....	39
FIGURA 5.7 TOP 20 RUTAS DE ESPAÑA POR NÚMERO DE PASAJEROS EN 2019. ....	40
FIGURA 5.8 TOP 20 RUTAS DE ESPAÑA POR NÚMERO DE VUELOS EN 2019.....	42
FIGURA 5.9 TIPO DE AVIÓN UTILIZADO EN LAS 20 RUTAS CON MÁS VUELOS EN ESPAÑA EN 2019. ....	44
FIGURA 5.10 EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PASAJEROS EN ESPAÑA EN LAS 20 RUTAS CON MÁS PASAJEROS (TOP 20 DE 2019). ....	45
FIGURA 5.11 DISTRIBUCIÓN VUELOS POR TIPO DE AVIÓN Y TIPO DE PROPULSIÓN PARA DISTINTOS RANGOS DE DISTANCIA EN ESPAÑA EN 2019. ....	46
FIGURA 5.12 EVOLUCIÓN DEL TAMAÑO MEDIO DE LOS AVIONES EN ESPAÑA POR RANGO DE DISTANCIA.....	47
FIGURA 5.13 EVOLUCIÓN DEL FACTOR DE EFICIENCIA EN ESPAÑA POR RANGO DE DISTANCIA.....	49

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

FIGURA 5.14 FACTOR DE EFICIENCIA POR TIPO DE AVIÓN PARA DISTINTOS RANGOS DE DISTANCIA EN ESPAÑA EN 2019.....	51
FIGURA 5.15 PKTs FRENTE A PIB <sub>RPC</sub> EN ESPAÑA DE 2001 A 2022.....	52
FIGURA 6.1 EMISIONES CO <sub>2</sub> TOTALES FRENTE A NÚMERO DE VUELOS EN ESPAÑA DE 2003 A 2019 POR TIPO DE VUELO Y RANGO DE DISTANCIAS. ....	53
FIGURA 6.2 ETAPA MEDIA FRENTE A TAMAÑO DE AVIONES EN ESPAÑA DE 2003 A 2019 POR TIPO DE VUELO Y RANGO DE DISTANCIAS. ....	55
FIGURA 6.3 EMISIONES CO <sub>2</sub> MEDIAS FRENTE A EFICIENCIA, EN ESPAÑA DE 2003 A 2019 POR TIPO DE VUELO Y RANGO DE DISTANCIAS. ....	55
FIGURA 6.4 EMISIONES CO <sub>2</sub> MEDIAS FRENTE A FACTOR DE OCUPACIÓN DE LOS VUELOS, EN ESPAÑA DE 2003 A 2019 POR TIPO DE VUELO Y RANGO DE DISTANCIAS. ....	56
FIGURA 9.1 DISTRIBUCIÓN DEL TOTAL DE VUELOS EN ESPAÑA POR TIPO DE CONEXIÓN EN 2019. ....	64
FIGURA 9.2 DISTRIBUCIÓN DEL TOTAL DE VUELOS EN ESPAÑA POR TIPO DE CONEXIÓN EN 2001. ....	64
FIGURA 9.3 EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE PASAJEROS EN ESPAÑA POR AEROPUERTOS. ....	65
FIGURA 9.4 DISTRIBUCIÓN VUELOS POR TIPO DE AVIÓN Y TIPO DE PROPULSIÓN PARA DISTINTOS RANGOS DE DISTANCIA EN ESPAÑA EN 2003. ....	65
FIGURA 9.5 DISTRIBUCIÓN VUELOS POR TIPO DE AVIÓN Y TIPO DE PROPULSIÓN PARA DISTINTOS RANGOS DE DISTANCIA EN ESPAÑA EN 2011. ....	66
FIGURA 9.6 EVOLUCIÓN DEL FACTOR DE EFICIENCIA TOTAL EN ESPAÑA.....	66
FIGURA 9.7 EMISIONES CO <sub>2</sub> MEDIAS FRENTE A ETAPA MEDIA EN ESPAÑA DE 2003 A 2019 POR TIPO DE VUELO Y RANGO DE DISTANCIAS. ....	67
FIGURA 9.8 PKTs FRENTE A PIB <sub>RPC</sub> EN ESPAÑA DE 2003 A 2019.....	67

## Índice de tablas

TABLA 5-1: TOP 20 RUTAS DE ESPAÑA POR VOLUMEN DE PASAJEROS EN 2019 Y SU ETAPA EN KILÓMETROS.....	41
TABLA 5-2: TOP 20 RUTAS DE ESPAÑA POR NÚMERO DE VUELOS EN 2019 Y SU ETAPA EN KILÓMETROS. ....	43
TABLA 6-1: VALORES ECUACIÓN DE REGRESIÓN EMISIONES DE CO2 TOTALES FRENTE A NÚMERO DE VUELOS. ....	54

# 1. Introducción

La aviación lleva ya algunos años en el punto de mira de las autoridades que supervisan el cumplimiento de los acuerdos climáticos como sector que tiene que poner freno a su impacto medioambiental.

Tradicionalmente se había considerado que el transporte aéreo tenía un impacto bajo sobre las emisiones de dióxido de carbono globales, solo un 3% del total<sup>1</sup>, por eso había sido excluido de algunos acuerdos internacionales sobre cambio climático, como el Acuerdo de París. Pero si otros sectores sensibles desde el punto de vista de su impacto económico toman medidas y empiezan a descarbonizarse, la aviación no puede quedarse atrás.

Por eso es importante analizar y entender este problema ahora. Las medidas de política energética y climática sobre la aviación se han acordado ya<sup>2</sup>, y no tardará en verse el efecto que pueden tener en el sector. Es un tema de gran actualidad que va a afectar al sector transversalmente: fabricantes de motores y aeronaves, aerolíneas, aeropuertos, proveedores de servicios de navegación aérea... así como a todos aquellos que hacen uso del transporte aéreo, como son empresas de logística, pasajeros de negocios o pasajeros de ocio.

En este trabajo se examina la evolución de los consumos energéticos y los factores de eficiencia para el análisis de diversos casos de estudio del impacto ambiental de la aviación civil. No obstante, hay que tener presente que el transporte aéreo comercial no solo contribuye a las emisiones de CO<sub>2</sub> si no también a otras emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Concretamente, en torno al 14% de las emisiones totales del sector Transporte en la Unión Europea (UE) provienen de la aviación<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> The Economist (Febrero, 2021)

<sup>2</sup> European Green Deal: new law agreed to cut aviation emissions by promoting sustainable aviation fuels, (2023). **European Commission**

<sup>3</sup> Comisión Europea (Julio, 2021)

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

En este trabajo se describe en primer lugar la estructura del tráfico aéreo en España. Entender cómo se distribuye la aviación, su uso de energía y sus emisiones de CO<sub>2</sub>, qué tipo de rutas se operan y con qué aviones, es imprescindible para mejorar nuestra comprensión del impacto que pueden tener las medidas de política energética y climática.

En segundo lugar, se analiza el efecto que tienen distintas variables relevantes para el servicio en los datos de consumo de combustible y de emisiones de CO<sub>2</sub>. Para ello se utilizan los métodos estadísticos del análisis de regresión. A la vista de la evidencia aportada como resultado de estos análisis de los datos, se discuten críticamente las distintas propuestas de política energética y climática que se barajan actualmente para el sector.

Las características del tráfico aéreo en España van a estar determinadas por dos factores principales: la geografía y la importancia que tiene como destino turístico dentro de la Unión Europea. España cuenta con aproximadamente 8.000 kilómetros de costa<sup>4</sup>, teniendo en cuenta el litoral peninsular, los archipiélagos de las islas Canarias y las islas Baleares, y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Un ingrediente clave para las circunstancias del transporte de viajeros.

España ocupa además una posición relevante en el comercio internacional y en sus áreas de influencia Iberoamericana. Conviene tener presente, en todo caso, que comparando con la Unión Europea en su conjunto, la economía española es una de las de mayor tamaño de la UE, aunque su PIB real per cápita está por debajo del promedio de la UE. Esto puede resultar en una mayor sensibilidad de la economía a los efectos de las políticas energéticas y climáticas que se implementen.

---

<sup>4</sup> <https://www.ign.es/> , Instituto Geográfico Nacional

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Para analizar estas cuestiones, en este trabajo se propone seguir la metodología de análisis de la gestión de rutas aéreas<sup>5</sup>. Por otro lado, en el marco del análisis del impacto ambiental, se abordarán las emisiones de CO<sub>2</sub> y su relación con la estructura del transporte, así como las proyecciones futuras. Para ello, en primer lugar, se examinará la evolución de la estructura del transporte aéreo en España.

A partir de esta descripción, se empleará la calculadora de emisiones de la Agencia Europea del Medio Ambiente para obtener una medida de la huella de carbono asociada a la aviación civil y las mejoras en los factores de eficiencia de las rutas aéreas. En el trabajo, se discuten diversas aproximaciones incorporadas en los cálculos. En cualquier caso, se anticipa que el impacto de dichas aproximaciones será moderado, ya que el enfoque principal se sustenta en la evaluación de las variaciones en las tendencias de eficiencia y emisiones, en lugar de los niveles absolutos de estas variables.

Desde la perspectiva de la motivación específica de este estudio, es relevante señalar que se ha observado una tendencia significativa en el crecimiento del número de pasajeros durante el período de estudio de 2001 a 2019, con un aumento anual promedio del 4%. Destaca una disminución evidente posterior a la crisis económica de 2008, que se situó alrededor del 7,5%, y una drástica reducción del tráfico debido a la pandemia Covid-19. En 2019, el número de pasajeros experimentó una disminución del 75% en comparación con los valores de 2018.

Este estudio busca responder a diversas preguntas fundamentales, como la evolución de la eficiencia en el sector y los factores determinantes en la evolución de las emisiones de la aviación civil en España. De manera más específica, se indaga si las condiciones económicas o las iniciativas adoptadas por el sector en respuesta a las políticas energéticas y la creciente preocupación por el cambio climático influyen en dicha evolución.

---

<sup>5</sup> **Alonso, Benito, Lonza y Kousoulidou.** (2014). Investigations on the distribution of air transport traffic and CO<sub>2</sub> emissions within the European Union. *Journal of Air Transport Management*.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Para responder a estas preguntas se procede a organizar los datos disponibles, proporcionados por EUROSTAT (datos incompletos, con información sobre pasajeros y asientos) y EUROCONTROL (datos detallados de los vuelos durante una semana tipo). A partir de esos datos se definen las variables relevantes para la metodología a aplicar.

Se obtiene evidencia sobre la evolución de las variables relevantes en el periodo de estudio como son el número de pasajeros y los factores de eficiencia (evidencia de series temporales), así como los ratios principales, como son el factor de ocupación y el consumo de combustible por vuelo. También se obtienen relaciones, entre los principales ratios, representadas como gráficos de nube de puntos para el conjunto de los datos (evidencia de sección cruzada).

El trabajo pone de manifiesto cómo han evolucionado los factores que influyen en las emisiones del transporte aéreo en España. Esta evolución se caracteriza a través de los resultados del análisis de regresión entre las principales variables objetivo, como son el número de pasajeros en relación con la actividad económica; y las emisiones de CO<sub>2</sub> en función de la etapa media, número de vuelos, eficiencia, ocupación y tamaño de los aviones.

Los resultados señalan que la eficiencia ha mejorado más de 2003 a 2019 en las rutas de entre 500 y 1000 km, seguidas por las rutas largas (de más de 6000 kilómetros).

La relación entre emisiones de CO<sub>2</sub> totales y el número de vuelos demuestra que la cantidad total de emisiones para los vuelos de más de 7000 kilómetros, muy largos y poco numerosos, es prácticamente la misma que para los vuelos de entre 1000 y 2000 kilómetros, más cortos y muy numerosos.

El trabajo se organiza de la siguiente forma. En la sección 2, se presenta el estado de la cuestión y de la metodología que se considera. En la sección 3, se abordan los aspectos generales de nuestro caso de estudio, se detalla la fuente de los datos y se introduce el marco para el análisis. La sección 4 se dedica a una exhaustiva exploración de la metodología propuesta y a la definición de las

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

variables clave que serán empleadas. La sección 5 analiza en detalle la estructura del transporte aéreo en España, así como de consumos de combustible, emisiones de CO<sub>2</sub> y factores de eficiencia. Esto permite en la sección 6 realizar una evaluación preliminar mediante análisis de regresión de los posibles determinantes del tráfico aéreo y sus correspondientes impactos ambientales. La sección 7 revisa en fin las principales propuestas de política energética y climática, así como sus posibles impactos a la vista de los resultados de este trabajo. Por último, la sección 8 explora posibles extensiones del estudio y futuras líneas de investigación, y presenta las principales conclusiones.

## 2. Estado del arte

La aviación comercial hoy en día es crucial para la sociedad tanto para la conectividad global como para el acceso a bienes y servicios. Pero el crecimiento exponencial que experimenta el sector hace que las emisiones de CO<sub>2</sub> sigan aumentando, y haya que poner atención en el impacto ambiental de la aviación.

Desde la perspectiva de la industria, el problema de las emisiones de CO<sub>2</sub> plantea muchos retos tecnológicos. Continuar los desarrollos para mejorar la eficiencia de los motores, mejoras aerodinámicas para las aeronaves y utilizar materiales más ligeros. Ahora hay que investigar para facilitar el acceso y la optimizar la producción de los combustibles de aviación sostenibles. Mantener la inversión en tecnologías de propulsión más limpias, como la propulsión por hidrógeno o por baterías.

A nivel político y regulatorio, es importante implantar medidas significativas y acuerdos internacionales. Teniendo en cuenta que los tiempos de implantación son muy lentos en el sector hay que abordar este desafío cuanto antes. Ahora mismo el objetivo común es tener emisiones netas cero en 2050.

En abril de este año, 2023, la comisión europea hacía público el acuerdo político alcanzado respecto a la propuesta ReFuelEU Aviation, como parte del paquete de medidas 'Fit for 55'.<sup>6</sup> El objetivo de este acuerdo es la descarbonización del sector de la aviación mediante la imposición de la mezcla de combustibles de aviación sostenibles (SAF) con los combustibles de aviación tradicionales (keroseno), con porcentajes crecientes a partir de 2025.

'Fit for 55' es un conjunto integral de normativas propuesto por la Comisión Europea para abordar los desafíos climáticos y ambientales. Este paquete legislativo se enfoca en la ambición de la UE de reducir drásticamente las

---

<sup>6</sup> European Green Deal: new law agreed to cut aviation emissions by promoting sustainable aviation fuels, (2023). **European Commission**

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

emisiones de gases de efecto invernadero y alcanzar la neutralidad climática para 2050.

Esta medida pretende reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> de las aeronaves, estimándose una disminución de alrededor de dos tercios para 2050 en comparación con un escenario de "no acción". Además, se espera que tenga un impacto positivo en la calidad del aire al reducir las emisiones no relacionadas con el CO<sub>2</sub>.

Las nuevas normas requerirán a los proveedores de combustible de aviación suministrar una cantidad mínima de SAF en los aeropuertos de la UE, comenzando en un 2% del combustible total para 2025 y aumentando hasta alcanzar un 70% para 2050<sup>7</sup>.

Además, se recomienda evitar las prácticas de "tankering", instando a las aerolíneas abastecerse solo con el combustible necesario para el vuelo. Evitando así emisiones relacionadas con el peso adicional.

Los aeropuertos deben garantizar que su infraestructura de suministro esté disponible y sea adecuada para la distribución de SAF.

Las emisiones de la aviación en Europa aumentaron un promedio del 5% anual entre 2013 y 2019, y se prevé un continuo crecimiento. Para lograr la neutralidad climática, la UE debe reducir las emisiones de transporte en un 90% para 2050 en comparación con los niveles de 1990.

Las medidas que va a aplicar la Unión Europea como parte del ReFuelEU Aviation ya las mencionaban Shell y Deloitte en su estudio "Decarbonising Aviation: Cleared For Take-Off. Industry Perspectives" de 2021<sup>8</sup>.

En este estudio se analiza la urgencia de actuar con rapidez, ya que en tanto que otros sectores se descarbonicen antes, el porcentaje que suponen las

---

<sup>7</sup> ReFuelEU Aviation - Sustainable Aviation Fuels. Impact Assessment (2020) **European Commission**.

<sup>8</sup> Decarbonising Aviation: CLEARED FOR TAKE-OFF. Industry Perspectives. (2021) **Shell in collaboration with Deloitte**

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

emisiones de CO<sub>2</sub> que provienen de la aviación será mayor. Plantea otras medidas como el uso de SAF, garantizar la demanda a largo plazo en el sector para que la industria pueda invertir más en desarrollos para la aviación sostenible y promocionar los offsets.

En resumen, el problema de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte aéreo requiere un enfoque transversal y una acción inmediata para garantizar que la aviación pueda seguir siendo un pilar fundamental para la sociedad sin comprometer el futuro del planeta.

### 3. Evidencia y marco para el análisis

Este capítulo explica cómo se ha realizado la parte más práctica de este trabajo. Se expone cuáles son los datos de partida y las fuentes de las que se han obtenido, así como la metodología a seguir para tratarlos. Utilizar esta metodología se justifica de acuerdo con el marco para el análisis. También se aclara las limitaciones que puede tener este análisis.

Antes de proceder con la descripción de los datos, se presentan algunas generalidades sobre el entorno socioeconómico del país de estudio, España, que son pertinentes para este trabajo.

#### 3.1 Generalidades

España se encuentra en el suroeste de Europa. Es un país con una rica historia, una gran diversidad geográfica y una economía en constante evolución. Como miembro de la Unión Europea (UE) desde 1986, España ha experimentado un proceso de desarrollo y cambio que ha transformado su panorama socioeconómico. En este apartado, analizaremos algunas generalidades del contexto socioeconómico y geográfico de España y lo compararemos con la UE en su conjunto, así como con algunos de sus estados miembros.

La geografía de España es muy diversa. Su territorio tiene una extensión de 505.944 km<sup>2</sup> y cuenta con aproximadamente 8.000 kilómetros de costa<sup>9</sup>, teniendo en cuenta el litoral peninsular, los archipiélagos de las islas Canarias y las islas Baleares, y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Esto tiene como consecuencia la importancia del tráfico aéreo doméstico, tanto por las grandes distancias que existen en el territorio peninsular como para comunicar las islas con la península. Limita al norte con Francia y Andorra, al oeste con Portugal, y al sur con Gibraltar y Marruecos a través del estrecho de Gibraltar. Su ubicación geográfica en el suroeste de Europa le otorga una posición

---

<sup>9</sup> <https://www.ign.es/> , Instituto Geográfico Nacional

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

estratégica en el cruce de caminos entre Europa y África. Así como en las comunicaciones con América, principalmente con América del Sur por los acercamientos culturales y la inmigración. En 2018, la inmigración de personas nacidas en países de América supuso un 49% del total<sup>10</sup>.

España cuenta con una amplia variedad de paisajes que incluyen las montañas de los Pirineos en el norte, extensas llanuras en el centro, y un litoral costero que se extiende a lo largo de más de 4,900 kilómetros. Estos factores geográficos han influido en su historia, cultura y economía. y es uno de los mayores destinos turísticos de la Unión Europea.

La economía española ha experimentado notables transformaciones en las últimas décadas. A lo largo de los años 80 y 90, España experimentó un rápido crecimiento económico, impulsado en gran medida por la inversión extranjera, el turismo y la construcción. Sin embargo, en 2008, España fue uno de los países más afectados por la crisis financiera global. Esta crisis tuvo un impacto significativo en el mercado inmobiliario y el desempleo, con tasas de paro que pasaron del 8% en 2007 hasta casi el 19% en 2009<sup>11</sup>.

Desde entonces, España ha logrado una recuperación notable. Las reformas económicas, la diversificación de la economía y el crecimiento del sector exportador han contribuido a su mejora económica. Además, el turismo sigue siendo un pilar fundamental de la economía española, con millones de visitantes internacionales cada año.

Comparando a España con la Unión Europea en su conjunto, vemos que la economía española es una de las más grandes de la UE. Sin embargo, su PIB real per cápita está por debajo del promedio de la UE. En 2021, el PIB real per cápita de la UE fue de 27.950 €pc y el de España de 23.450 €pc, situándose en el puesto número 13 de los 27<sup>12</sup>. En cuanto a la tasa de desempleo, aunque ha

---

<sup>10</sup> **INE.** (2018)

<sup>11</sup> **Banco de España.** (2010) La economía española en la crisis mundial.

<sup>12</sup> **Eurostat.** (2021)

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

disminuido significativamente desde la crisis de 2008, aún es relativamente alta en comparación con el promedio de la UE.

España es miembro de la UE, del espacio Schengen desde 1995 y participa en organizaciones internacionales como la ONU y la OTAN. En cuanto a su relación con la UE, España ha experimentado los beneficios de la adhesión a la UE, incluyendo la inversión extranjera y el acceso a un mercado único.

En la Figura 3.1 se puede ver como las tendencias que sigue el PIB real per cápita en España y el agregado de la Unión Europea siguen tendencias similares a lo largo de los años. Tras la crisis de 2008, la caída fue más pronunciada para España. También la crisis provocada por la pandemia del COVID-19 ha tenido un efecto mayor en España que en el agregado de los países de la Unión Europea. Además, se puede observar cómo estamos en un momento de crecimiento y recuperación económicas que tienen efectos sobre el aumento de la aviación comercial.

La pandemia ha tenido gran parte de culpa de incorporar muchos mecanismos para estar conectados en remoto a nuestro día a día: las videollamadas, el teletrabajo... Sin embargo, después de haber estado encerrados, también la gente tiene más ganas de viajar que nunca.

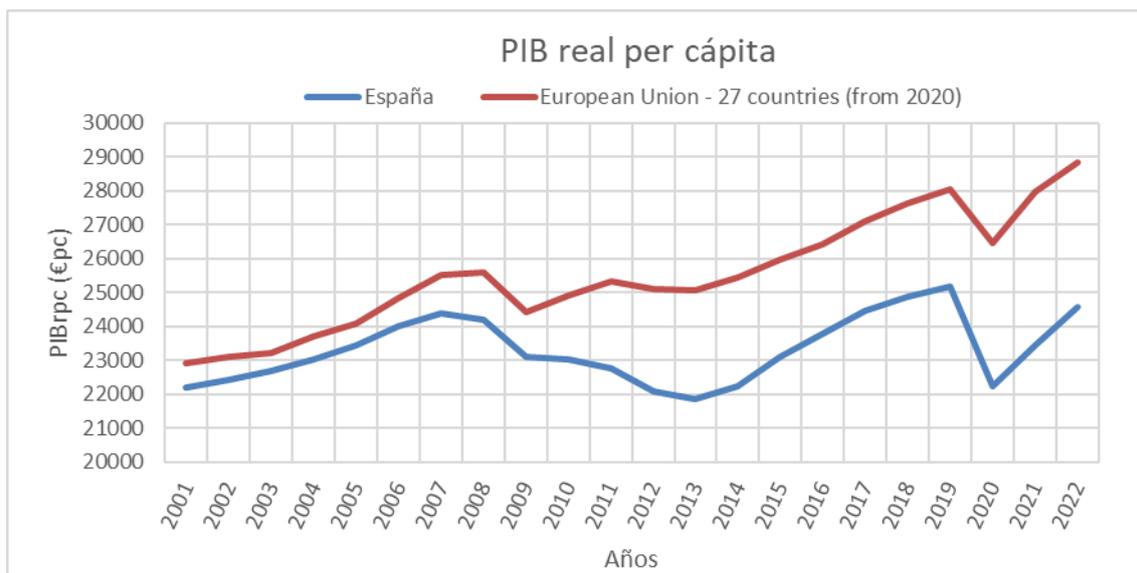


Figura 3.1 Evolución del PIB real per cápita en España y la UE de 2001 a 2022.

Elaboración propia con datos de Eurostat.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Para comparar cómo ha evolucionado el tráfico aéreo en relación con la economía española, la Figura 3.2 presenta el desarrollo de 2003 a 2019, sin tener en cuenta los años de la pandemia y su efecto.

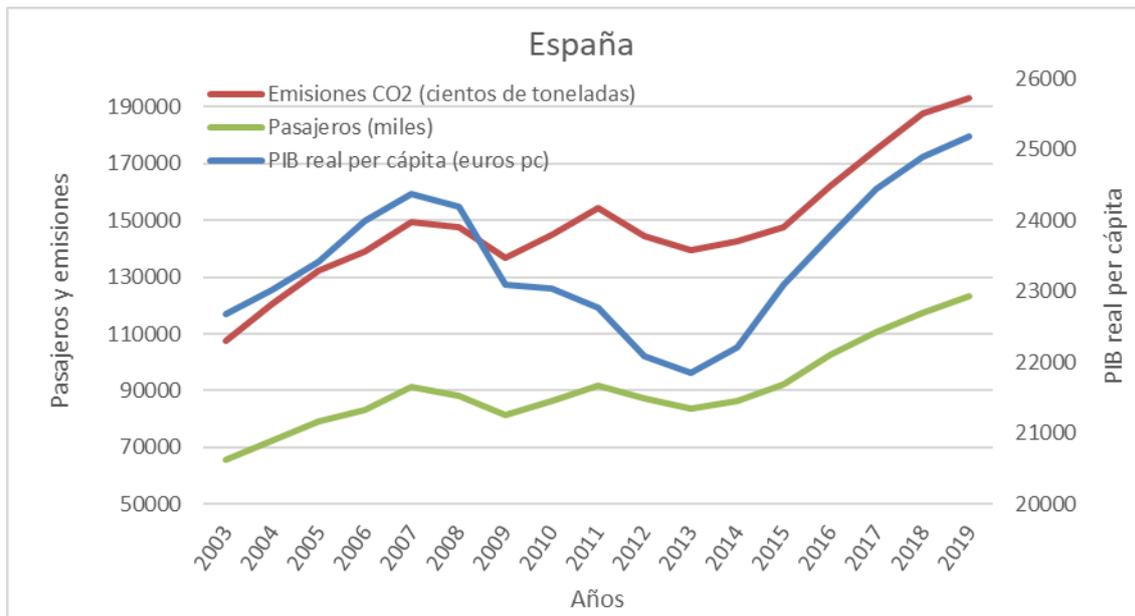


Figura 3.2 Evolución del PIB real per cápita, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el número de pasajeros en avión en España de 2003 a 2019.

*Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.*

Este gráfico de líneas refleja en doble escala el número de pasajeros (en miles), las emisiones de CO<sub>2</sub> (en cientos de toneladas) en España, a la izquierda, y el PIB real per cápita (euros per cápita), a la derecha.

Se puede apreciar un crecimiento más o menos continuo en el número de pasajeros a lo largo de los años. Se da un descenso tras la crisis de 2008 que parece ligero si lo comparamos con lo que se resiente el PIB<sub>rpc</sub> durante esos años. En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, siguen las mismas tendencias que el número de pasajeros, pero se puede notar como las pendientes de la curva de emisiones son más pronunciadas. Esto quiere decir que las emisiones aumentan más rápido que el número de pasajeros.

### 3.2 Marco para el análisis y fuentes de los datos

El marco para el análisis que justifica los datos que se van a evaluar en este trabajo es aquel que pone el foco en las rutas que se operan y cómo es la estructura del transporte aéreo en esa región o país para evaluar cuál es el efecto de las mejoras en eficiencia energética del transporte aéreo.<sup>13</sup>

Algunas de estas mejoras pasan por eliminar las rutas de corto radio (debido a que las maniobras de despegue y aterrizaje suponen un gran consumo de combustible), optimizar el uso de determinados tipos de avión para rutas de ciertas características y racionalizar las rutas de largo radio (por la gran carga de combustible que deben transportar).

Asimismo, se van a evaluar otras medidas de política energética como el uso de combustibles de aviación sostenible (SAF), la compensación de emisiones con *offsets*, las mejoras aerodinámicas y renovación de la flota, mejorar la eficiencia operacional e incluso las tecnologías de propulsión alternativas, como las baterías o el hidrógeno.

Se obtienen los datos de dos fuentes principales: la base de datos de transporte aéreo de Eurostat y el Repositorio de Datos sobre la Demanda (DDR) de Eurocontrol.

---

<sup>13</sup> **Alonso, Benito, Lonza y Kousoulidou.** (2014) Investigations on the distribution of air transport traffic and CO2 emissions within the European Union. *Journal of Air Transport Management*

### 3.3 Descripción de los datos

Los datos obtenidos de la base de datos de transporte aéreo de Eurostat dan información anual por ruta sobre tres mediciones distintas: pasajeros a bordo, vuelos comerciales de pasajeros y plazas de pasajeros disponibles. Todo medido solo para salidas, porque si considerásemos salidas y llegadas estaríamos duplicando la información.

La muestra es de 1934 rutas con salida de los aeropuertos españoles por 22 años, de 2001 a 2022. Teniendo en cuenta las tres mediciones distintas que se hacen, se cuenta con 127.644 datos. Hay que tener en cuenta que las rutas que tienen origen y destino en un aeropuerto español se cuentan como rutas distintas dependiendo del sentido en el que vuela el avión, del aeropuerto A al aeropuerto B o viceversa. Además, aunque se cuenta con datos de Eurostat de 2001 a 2022, muchos de los cálculos de este trabajo se harán utilizando los datos de 2003 a 2019 porque es la muestra que se tiene de los datos de Eurocontrol. Teniendo esto en cuenta la muestra se quedaría en 98.634 datos.

Con los datos de Eurostat no tenemos información sobre el tipo de avión con el que se ha volado esta ruta y por lo tanto no podemos calcular el combustible consumido ni las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Eurocontrol es la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea, es una organización civil-militar paneuropea dedicada a apoyar la aviación europea a la que pertenecen 41 estados miembros y 2 estados con acuerdos especiales.<sup>14</sup> En el repositorio de Eurocontrol se encuentra la información de todos los vuelos que han sobrevolado Europa con información sobre los mismos como el modelo de avión, el motor o la duración del vuelo. Se extrae los datos de los vuelos para una semana tipo de cada año. Los estudios dicen que utilizar la segunda semana de junio puede ser bastante

---

<sup>14</sup> Eurocontrol

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

representativo<sup>15</sup>. Se hace un filtrado de estos datos para mantener aquellos vuelos de transporte de pasajeros, programados o no programados y con origen o destino en un aeropuerto español. La muestra que se obtiene de Eurocontrol es de 472.735 vuelos a lo largo de 17 años, con una media de 27.808 vuelos en la semana tipo de cada año.

La muestra de datos de 2003 a 2019 es de 571.369 datos, aunque si tenemos en cuenta los datos de Eurostat de 2001 a 2022 la muestra total es de 600.379 datos.

La información obtenida de Eurocontrol incluye más datos de los que se van a utilizar en el análisis como por ejemplo la hora del vuelo o la matrícula del avión. No obstante, resumimos aquí los parámetros más relevantes para el análisis entre los que están:

- **Aeropuertos de origen y destino:** para escoger las rutas de los países del estudio, calcular la distancia del vuelo y conocer si el vuelo es doméstico, intracomunitario o extracomunitario.
- **Modelo de avión:** para descartar los vuelos de carga, calcular las emisiones y distinguir entre aviones regionales, de pasillo único o de pasillo doble. También es importante para conocer los modelos más modernos, más eficientes.
- **Operador:** como segundo contraste para descartar los vuelos de carga.
- **Tipo de vuelo:** distingue entre vuelos programados (S), no programados (N), militares (M), no identificados (X) y de aviación general (G) como los de avionetas privadas. Permite estudiar los vuelos comerciales de rutas regulares, es decir, los vuelos programados, y los vuelos chárter, es decir, los no programados.

---

<sup>15</sup> **Alonso, Benito, Lonza y Kousoulidou.** (2014) Investigations on the distribution of air transport traffic and CO2 emissions within the European Union. *Journal of Air Transport Management*

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

- **Tipo de motor:** para el cálculo de las emisiones y distinguir entre aviones con turbohélice (o turboeje) o con turborreactor.
- **Año de fabricación del avión:** los aviones más antiguos tendrán menos mejoras aerodinámicas y por tanto consumirán más combustible y producirán más emisiones. Se puede controlar por la edad de las aeronaves.

Por último, los datos de combustible y emisiones se obtendrán a través de la calculadora de emisiones de la Agencia Europea del Medio Ambiente. Con esta herramienta se puede calcular el consumo de combustible cruzando cada modelo de avión con la distancia recorrida por el vuelo. La calculadora toma el motor más común usado en cada modelo de avión en el año 2015. Además, se utiliza un factor de equivalencia para valorar las mejoras en consumos de los aviones más modernos. Asimismo, una vez calculado el combustible consumido se puede conocer las emisiones generadas. Por ejemplo, por cada kilogramo de keroseno quemado se producen 3.15kg de CO<sub>2</sub>, 1.23kg de vapor de agua, 0.84 g de SO<sub>x</sub> y, dependiendo de la duración del vuelo, en torno a 15g de NO<sub>x</sub>, 10g de CO y 2g de HC.<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> **Agencia Europea del Medio Ambiente.** (2016). Master emissions calculator. 1.A.3.a Aviation - Annex 5

## 4. Metodología

El punto de partida consiste en seleccionar todos los vuelos que volaron o sobrevolaron Europa durante una semana tipo de cada año. Según los estudios más representativos en esta literatura la mejor semana para estimar el resto del año es la segunda semana de junio, ya que no es temporada ni muy alta ni muy baja. La evidencia sugiere que los resultados quedarán sobreestimados en torno a un 10 % respecto a la semana media del año. Otros estudios seleccionan en su lugar una semana de mitad de septiembre.

En cualquier caso, en este estudio se pretende valorar las tendencias a lo largo de un período de tiempo, de 2003 a 2019, y por tanto el crecimiento observado en las variables de interés de un año a otro, y no tanto los resultados en niveles.

No sería práctico tomar todos los datos que, en conjunto, constituyen el inventario de emisiones. La estimación en este estudio se realiza combinando la información sobre el grado en el que se realiza una actividad humana, denominada datos de actividad, con coeficientes que cuantifican las emisiones. Es decir, en este caso, el dato de actividad sería el combustible empleado y los coeficientes se obtendrían de ver cuántas emisiones de CO<sub>2</sub> produce cada unidad de combustible.

Para el cálculo de las emisiones se utiliza la metodología de nivel 3 descrita en el informe de 2019 de la agencia europea del medio ambiente. Dicha metodología supone un esfuerzo por ir más allá de las relaciones lineales entre los datos de actividad y los factores de emisión, utilizando para ello los datos de los vuelos que aterrizan o despegan de un país. La principal contribución de la metodología más elaborada es poder calcular las emisiones para cada modelo de avión teniendo en cuenta la distancia y cuánto combustible consume dicho modelo de avión.

## 4.1 Definición de variables

Se procede a la elaboración de una tabla para cada año dentro del período de 2003 a 2019 utilizando los datos adquiridos de Eurostat y Eurocontrol. Estas tablas contienen variables organizadas según el tipo de ruta (doméstica, intracomunitaria o extracomunitaria) y rangos de distancias en kilómetros.

Para clasificar como vuelos intracomunitarios, se consideran aquellos que tienen operaciones de aterrizaje o despegue en países que forman parte de la Unión Europea (UE). Es importante señalar que se excluyen del conjunto a Reino Unido, Suiza y Noruega, a pesar de tener acuerdos especiales que les permiten la libre circulación en sus respectivas fronteras. Tanto Suiza como Noruega son parte del espacio Schengen, mientras que Reino Unido fue miembro de la Unión Europea hasta el 1 de febrero de 2020.

A partir de los datos proporcionados por **Eurostat**, se selecciona la información para cada categoría (identificada con el subíndice "C") en función de los criterios establecidos. Se procede a la construcción de variables específicas, que incluyen:

- Número de vuelos: suma de los vuelos.

$$Vuelos_c = \sum_{i=1}^n Vuelos_{ruta\ i} \quad (4.1)$$

- Pasajeros: suma de los pasajeros.

$$Pasajeros_c = \sum_{i=1}^n Pasajeros_{ruta\ i} \quad (4.2)$$

- Asientos: suma de los asientos.

$$Asientos_c = \sum_{i=1}^n Asientos_{ruta\ i} \quad (4.3)$$

- Etapa media: distancia entre los aeropuertos de origen y de destino de la ruta, ponderada con el número de vuelos de cada categoría.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

---

$$Etapa\ media_c = \frac{\sum_{i=1}^n [distancia(km) \times vuelos]_{ruta\ i}}{\sum_{i=1}^n vuelos_{ruta\ i}} \quad (4.4)$$

La distancia entre dos aeropuertos se calcula como la separación entre dos puntos en un círculo máximo de la esfera. En la sección 0 se detalla este cálculo.

- Pasajeros por Kilómetro Transportados (PKT): se suman los PKT de cada ruta.

$$PKT_{ruta\ i} = pasajeros_{ruta\ i} \times distancia\ (km)_{ruta\ i} \quad (4.5)$$

$$PKT_c = \sum_{i=1}^n PKT_{ruta\ i} \quad (4.6)$$

- Asientos por Kilómetro Ofertados (AKO): se suman los AKO de cada ruta.

$$AKO_{ruta\ i} = asientos_{ruta\ i} \times distancia\ (km)_{ruta\ i} \quad (4.7)$$

$$AKO_c = \sum_{i=1}^n AKO_{ruta\ i} \quad (4.8)$$

- Factor de Ocupación (FO): número de pasajeros entre número de asientos de la categoría.

$$FO_c = \frac{Pasajeros_c}{Asientos_c} \quad (4.9)$$

- Asientos/vuelo: número de asientos entre número de vuelos de la categoría.

$$\left[Asientos/Vuelo\right]_c = \frac{Asientos_c}{Vuelos_c} \quad (4.10)$$

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

En primer lugar, se procede al filtrado de los datos de **Eurocontrol**, hay que quitar aquellos vuelos que no se encuentran dentro del alcance del estudio. Esto incluye vuelos de carga, vuelos militares, vuelos de aviación general (privados) y vuelos no identificados. El objetivo primordial es trabajar exclusivamente con datos relacionados con vuelos comerciales.

Para eliminar los datos correspondientes a vuelos de carga, se quitan los vuelos de compañías aéreas y modelos de aeronaves dedicados exclusivamente al transporte de carga, así como los modelos utilizados por ciertas compañías para operaciones de carga. Se basa en los datos de compañías y modelos de carga correspondientes al año 2016.

Además, se excluyen los datos relacionados con vuelos militares (M), vuelos de aviación general (G) y vuelos no identificados (X). De esta manera, se seleccionan únicamente los vuelos comerciales, de rutas regulares programadas (Scheduled, S) y vuelos chárter no programados (Non-scheduled, N).

En cada sección de la tabla, se consideran los datos de las rutas que cumplen con los respectivos criterios. Además, los datos correspondientes a una semana tipo se extrapolan multiplicándolos por el número de semanas en un año (365/7) para obtener datos anuales, lo cual posiblemente resulte en una sobrestimación de los datos anuales reales.

Los datos proporcionados por Eurocontrol en la tabla para cada categoría serán aquellos relacionados con vuelos que satisfagan los criterios específicos y se calcularán de acuerdo con:

- Número de vuelos: número de vuelos que cumplen los criterios x 365/7.

$$Vuelos_c = \frac{365}{7} \times \sum_{i=1}^n Vuelos_{vuelo\ i} \quad (4.11)$$

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

- Etapa media: media de las distancias entre el aeropuerto de origen y de destino de los vuelos.

$$Etapa\ media_c = \frac{\sum_{i=1}^n distancia(km)_{vuelo\ i}}{\sum_{i=1}^n Vuelos_{vuelo\ i}} \quad (4.12)$$

- Combustible total: suma de combustible de los vuelos que cumplan los criterios x 365/7.

$$Combustible\ total_c = \frac{365}{7} \times \sum_{i=1}^n Combustible_{vuelo\ i} \quad (4.13)$$

- Combustible Turbohélice (TH), regional (Reg.), pasillo único (P.U.) y pasillo doble (P.D.): suma de combustible de los vuelos para cada modelo de avión que cumplan los criterios x 365/7.

$$Comb.\ TH_c = \frac{365}{7} \times \sum_{i=1}^n Comb.\ TH.\ vuelo\ i \quad (4.14)$$

$$Comb.\ Reg._c = \frac{365}{7} \times \sum_{i=1}^n Comb.\ Reg.\ vuelo\ i \quad (4.15)$$

$$Comb.\ P.\ U._c = \frac{365}{7} \times \sum_{i=1}^n Comb.\ P.\ U.\ vuelo\ i \quad (4.16)$$

$$Comb.\ P.\ D._c = \frac{365}{7} \times \sum_{i=1}^n Comb.\ P.\ D.\ vuelo\ i \quad (4.17)$$

### 4.1.1 Reescalado y resumen resultados

Dado que en este estudio se busca establecer una relación entre el volumen de pasajeros en diferentes rutas a lo largo de los años y las emisiones correspondientes, desglosadas por tipo de ruta y modelo de aeronave, se requiere vincular la información obtenida de Eurostat, que proporciona el recuento de pasajeros por ruta, con los datos de Eurocontrol, que ofrece detalles sobre los modelos de avión utilizados.

Sin embargo, es importante señalar que se presentan discrepancias que oscilan en torno al 10% en el número de vuelos entre Eurostat y Eurocontrol, y para algunas rutas, estas discrepancias pueden alcanzar hasta un 50%. Estas discrepancias surgen debido a que no todos los vuelos son registrados en Eurostat, y la información de Eurocontrol se basa en una semana típica para representar el año completo.

Por lo tanto, se llevará a cabo un proceso de reescalado para poder comparar los datos obtenidos de ambas fuentes. La tabla final incluirá una sección adicional denominada "Resumen de Resultados", que incluirá:

- Combustible reescalado: resultado de dividir el total de combustible entre el número de vuelos de Eurocontrol multiplicado por el número de vuelos de Eurostat, lo que proporcionará una estimación del combustible proporcional a esta cantidad de vuelos.

$$Comb. Reesc._c = \left[ \frac{Comb. Tot._c}{N^o Vuelos_c} \right]_{Eurocontrol} \times [N^o Vuelos_c]_{Eurostat} \quad (4.18)$$

- Factor de eficiencia: resultado de dividir el combustible total anual reescalado entre los PKTs anuales de Eurostat. Tendrá un valor mínimo en torno a 0,03 kg /PKT. Corresponde con el combustible por unidad de pasajero y kilómetro.

$$Factor\ eficiencia_c = \frac{Combustible\ reescalado_c}{[PKT_c]_{Eurostat}} \quad (4.19)$$

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

En el caso en que no se disponga de datos de Eurostat para una categoría específica, pero sí de Eurocontrol, no es posible realizar el proceso de reescalado, lo que impide la obtención de los PKTs. Una alternativa viable consiste en obtener los PKTs a partir de la información proporcionada por Eurocontrol, teniendo en cuenta tanto el tamaño de la aeronave, expresado como el número de asientos por vuelo, como el índice de ocupación representativo de ese año en particular. De esta manera, el cálculo de los pasajeros medios por vuelo, por la distancia de casa vuelo y por el número total de vuelos, permitiría obtener los PKTs correspondientes a esa categoría.

## 4.2 Cálculo de la distancia

La distancia entre dos aeropuertos se calcula como la distancia entre dos puntos sobre un círculo máximo de la esfera.

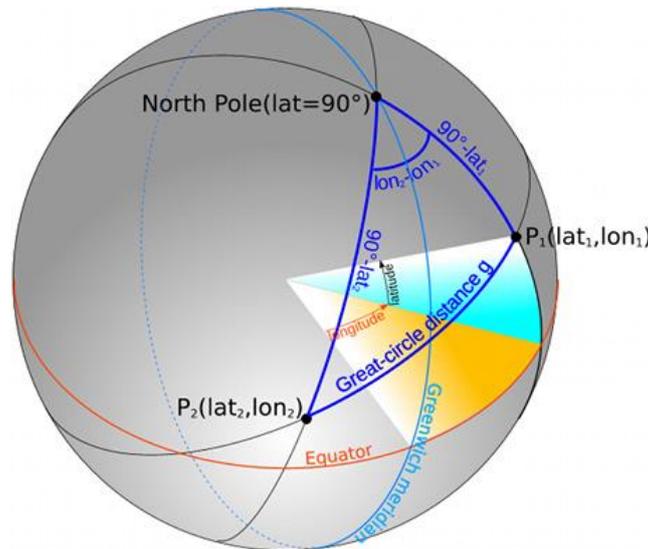


Figura 4.1 Distancia entre dos puntos sobre un círculo máximo de la Tierra  
Fuente: Geodesy PHP

Como se puede observar en la Figura 4.1, los puntos quedan definidos por su latitud y longitud y la distancia entre ambos se puede calcular con relaciones trigonométricas. La fórmula que se ha utilizado para calcular la distancia entre aeropuertos es la siguiente:

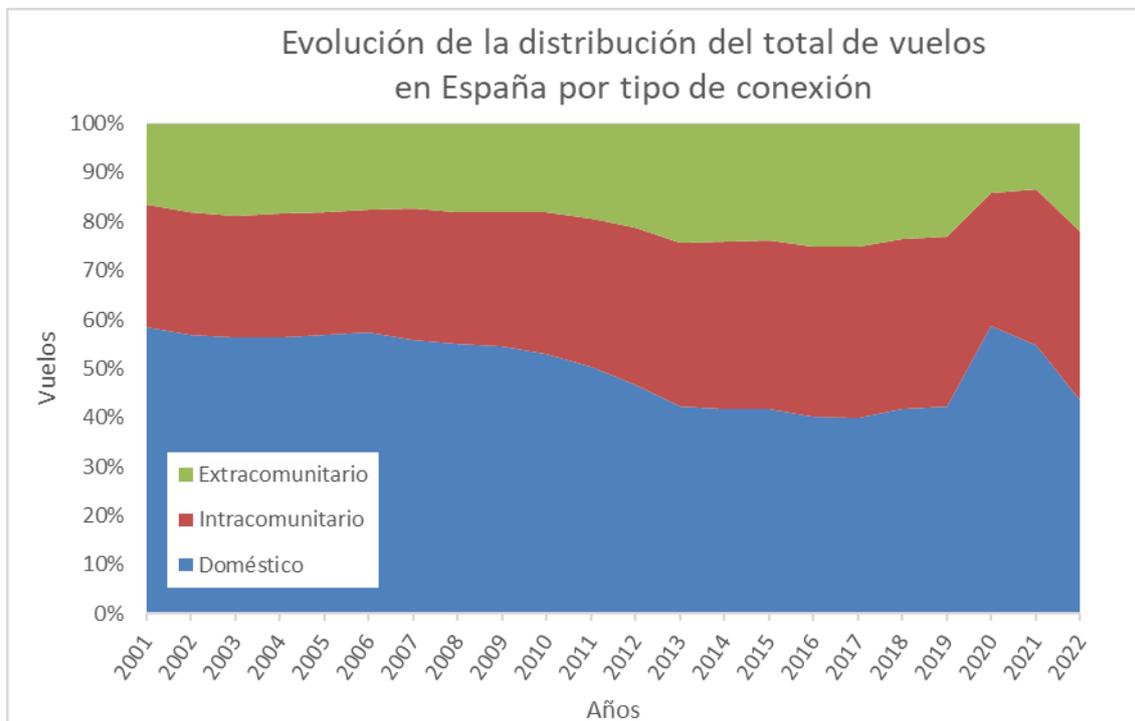
$$D = 2 R_T \sin^{-1} \sqrt{\left(\sin\left(\frac{(lat_1 - lat_2)}{2}\right)\right)^2 + \cos(lat_1) \cos(lat_2) \left(\sin\left(\frac{(lon_1 - lon_2)}{2}\right)\right)^2} \quad (4.20)$$

En este caso el radio de la esfera es el radio de la tierra,  $R_T$ ; “lat” y “lon” la latitud y la longitud respectivamente en radianes en las que se encuentra el aeropuerto y los subíndices 1 y 2 hacen referencia a los aeropuertos de origen y destino de la ruta.

## 5. Análisis de los datos

### 5.1 Estructura del transporte aéreo

España tiene un tráfico aéreo muy diverso. El tráfico aéreo doméstico tiene un enorme peso, en 2019 el 42% de los vuelos que despegaron de los aeropuertos españoles tuvieron como destino otro aeropuerto español (ver Figura 9.1). Aunque este peso se ha reducido con el paso del tiempo en favor de los vuelos intracomunitarios (i.e. dentro de la Unión Europea) y extracomunitarios. En 2001 los vuelos domésticos supusieron un 58% del total.



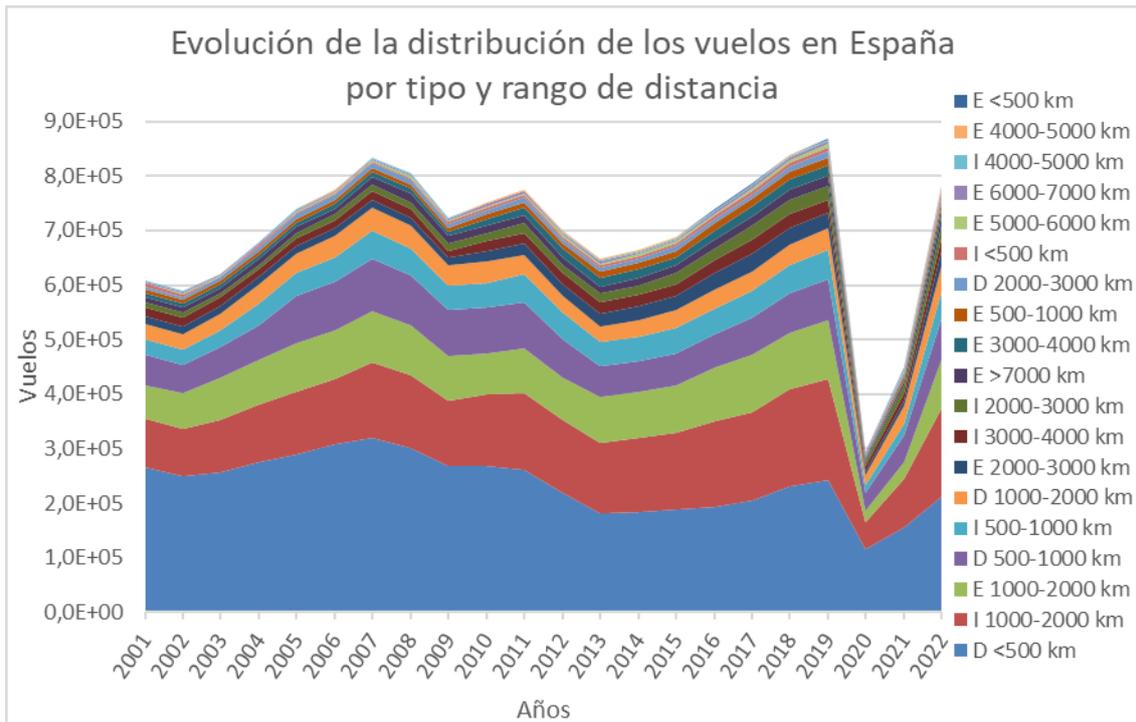
*Figura 5.1 Evolución de la distribución del total de vuelos en España por tipo de conexión. Elaboración propia con datos de Eurostat.*

En cuanto al tráfico dentro de la Unión Europea, ha aumentado de un 25% en 2001 a un 35% en 2019. Y el tráfico extracomunitario, a países fuera de la Unión Europea, ha aumentado de un 17% en 2001 a un 23% en 2019.

En la Figura 5.2 se separan estas categorías por tramos de distancias de distancias y se representa el número de vuelos en valor absoluto en lugar de en porcentaje. Se puede ver que los tipos de vuelos más numerosos en

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

España son: el doméstico de menos de 500 kilómetros, seguido del intracomunitario y el extracomunitario de entre 1000 y 2000 kilómetros y, por último, los vuelos domésticos e intracomunitarios de entre 500 y 1000 kilómetros. El resto de tipos de conexiones por rangos de distancias tienen un número de vuelos más reducido.



*Figura 5.2 Evolución de la distribución de los vuelos en España por tipo y rango de distancia. Elaboración propia con datos de Eurostat.*

Leyenda: "D" i.e. doméstico, "I" i.e. intracomunitario y "E" i.e. extracomunitario.

Se considera un vuelo de medio alcance a aquellos de 1500 a 4000 kilómetros y de muy corto alcance a aquellos de menos de 500 kilómetros.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Eurocontrol

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

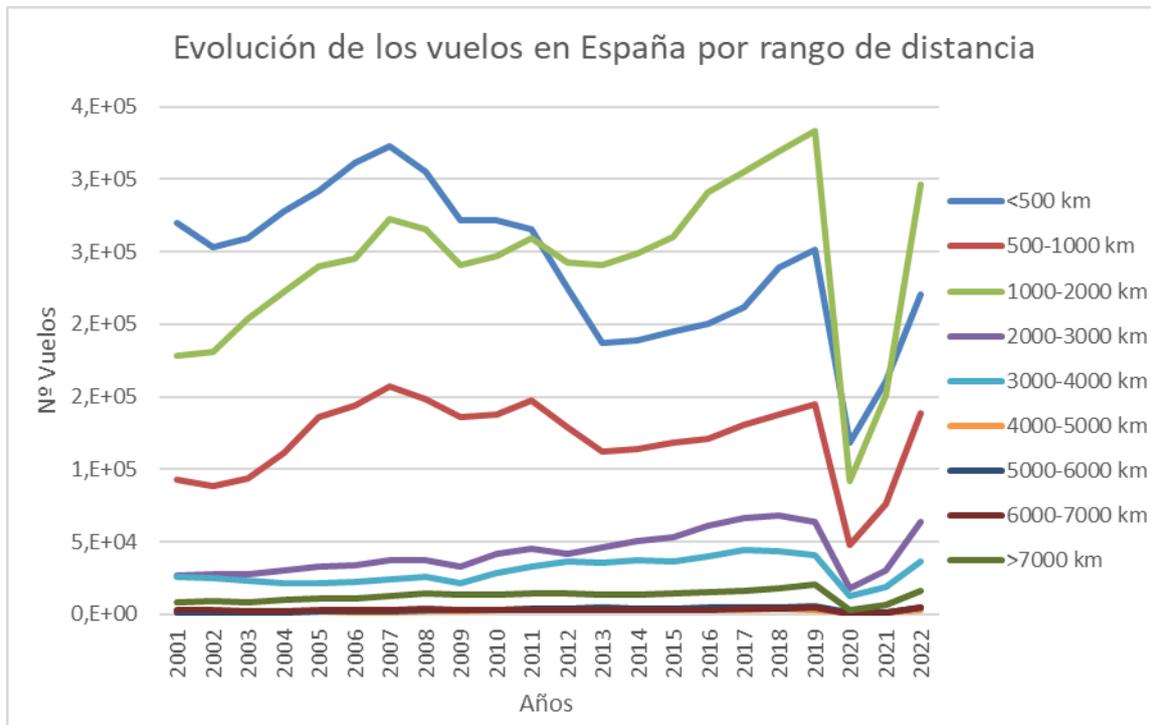


Figura 5.3 Evolución del número de vuelos en España por rango de distancia.  
Elaboración propia con datos de Eurostat.

Se analizará en el apartado 5.1.2 las rutas concretas y qué ejemplos representativos hay para estos rangos de distancias.

### 5.1.1 Aeropuertos

La red de AENA cuenta con 48 aeropuertos en España<sup>18</sup>, de los cuales se han tenido en cuenta para este estudio los 35 que se muestran en el mapa de la Figura 5.4. Estos aeropuertos son los que tienen vuelos de acuerdo con la base de datos de Eurostat.

Por número de pasajeros, los tres aeropuertos que acumulan el mayor volumen de tráfico aéreo comercial son Madrid, Barcelona y Palma de Mallorca; de ellos salen en torno al 55% de los pasajeros de vuelos con origen en España. Se alcanza el 75% de los viajeros sumando aquellos con origen en Málaga,

<sup>18</sup> <https://www.aena.es/es/pasajeros/nuestros-aeropuertos.html>, AENA

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Alicante, Gran Canaria y Tenerife Sur. El 25% restante procede de los otros 28 aeropuertos españoles contemplados en este análisis<sup>19</sup>.

Cabe destacar el importante crecimiento del número de pasajeros del aeropuerto de Barcelona desde 2009, según se observa en la Figura 5.5.



Figura 5.4 Mapa aeropuertos en España tenidos en cuenta para este estudio.  
Elaboración propia utilizando [www.gcmap.com](http://www.gcmap.com).

Estos aeropuertos están situados principalmente en las grandes ciudades, a lo largo del litoral español, en las islas Baleares y en las islas Canarias. Esta distribución de los aeropuertos queda justificada por lo que ya se comentaba en el apartado 3.1, el turismo es un pilar fundamental para la economía española.

<sup>19</sup> Ver Figura 9.3.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

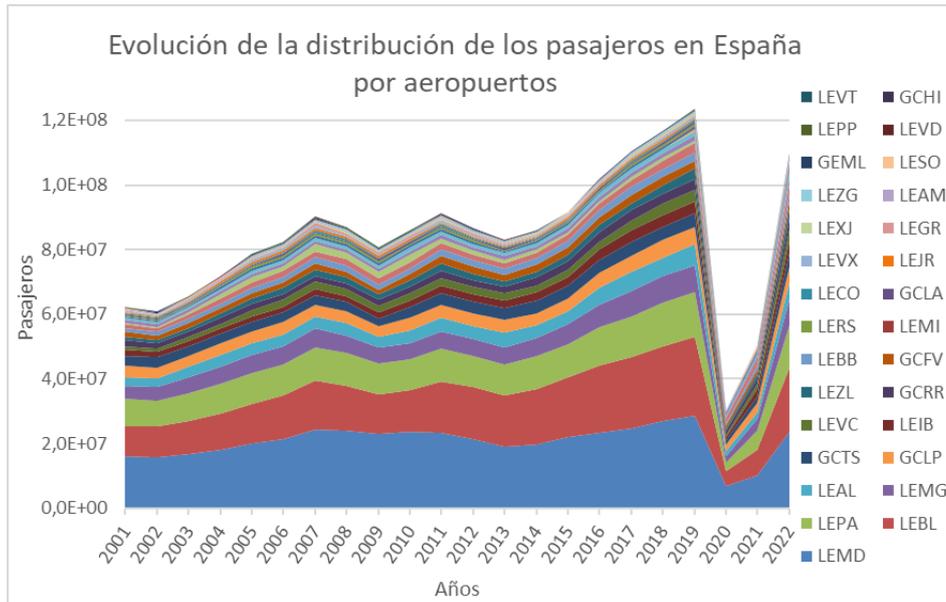


Figura 5.5 Evolución de la distribución de los pasajeros en España por aeropuertos.  
Elaboración propia con datos de Eurostat.

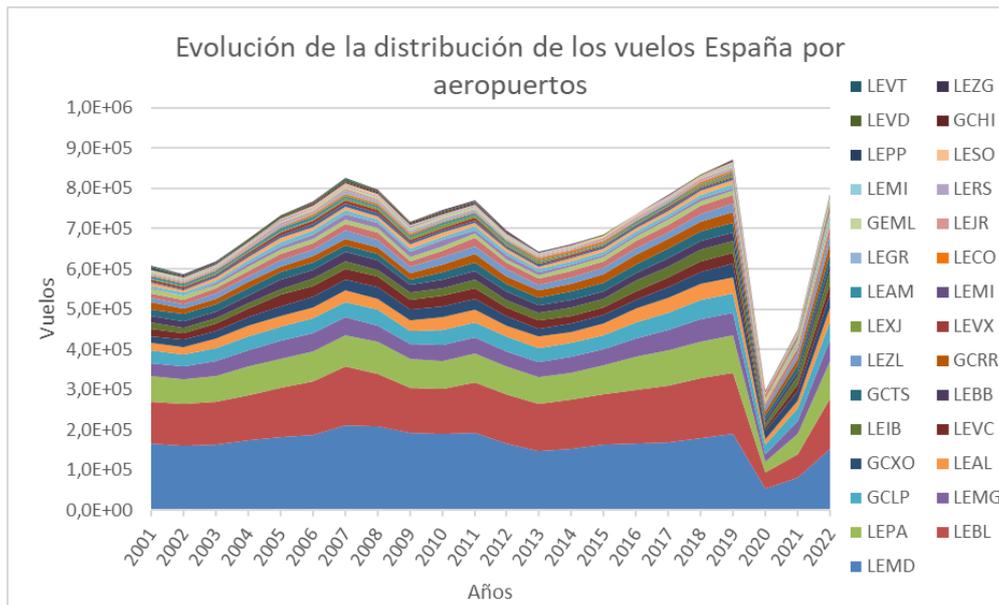


Figura 5.6 Evolución de la distribución de los vuelos en España por aeropuertos.  
Elaboración propia con datos de Eurostat.

Leyenda: "LEMD" i.e. Madrid, "LEBL" i.e. Barcelona, "LEPA" i.e. Palma De Mallorca, "LEMG" i.e. Málaga, "LEAL" i.e. Alicante, "GCLP" i.e. Gran Canaria, "GCTS" i.e. Tenerife Sur, "LEIB" i.e. Ibiza, "LEVC" i.e. Valencia, "GCRR" i.e. Lanzarote, "LEZL" i.e. Sevilla, "GCFV" i.e. Fuerteventura, "LEBB" i.e. Bilbao, "GCXO" i.e. Tenerife Norte, "LEGE" i.e. Girona, "LEMH" i.e. Menorca, "LEST" i.e. Santiago, "LEMI" i.e. Murcia, "LEAS" i.e. Asturias, "LEMI" i.e. Murcia, "LERS" i.e. Reus, "GCLA" i.e. La Palma, "LECO" i.e. A Coruña, "LEJR" i.e. Jerez, "LEVX" i.e. Vigo, "LEGR" i.e. Granada, "LEXJ" i.e. Santander, "LEAM" i.e. Almería, "LEZG" i.e. Zaragoza, "LESO" i.e. San Sebastián, "GEML" i.e. Melilla, "LEVD" i.e. Valladolid, "LEPP" i.e. Pamplona, "GCHI" i.e. El Hierro y "LEVT" i.e. Vitoria.

## 5.1.2 Rutas

En este apartado se va a analizar las principales rutas en España por número de vuelos y por número de pasajeros. De esta forma se va a destacar ciertas rutas habituales que utilizan aviones pequeños.

Las 20 rutas con origen en un aeropuerto español con mayor volumen de pasajeros son las que se muestran en el mapa de la Figura 5.7 y en la Tabla 5-1. Se puede ver como los aeropuertos de Madrid y Barcelona funcionan como principales hubs. Destacan las conexiones con los principales aeropuertos de las islas Canarias, Tenerife y Gran Canaria, y las islas Baleares, Ibiza y Mallorca, así como conexiones con las capitales europeas, como Londres, París y Lisboa, entre otros.

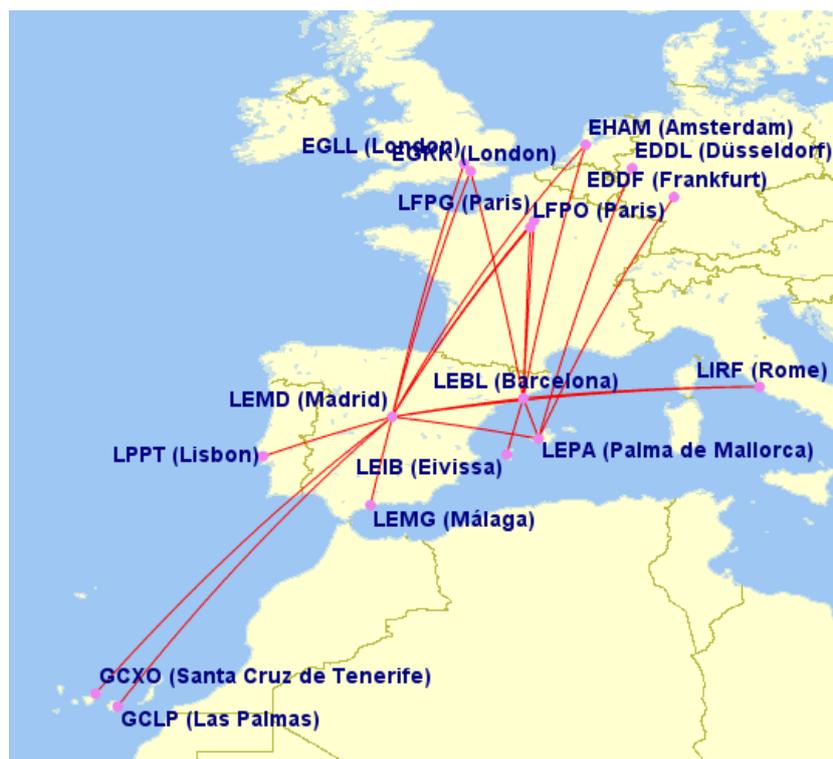


Figura 5.7 Top 20 rutas de España por número de pasajeros en 2019. Elaboración propia con datos de Eurostat, utilizando [www.gcmmap.com](http://www.gcmmap.com).

En la Tabla 5-1 se ha incluido la etapa en kilómetros de cada una de estas rutas junto con unas barras que sirven de guía para hacer comparaciones entre ellas.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Ranking	Ruta OACI	Ruta	Etapa (km)
1	LEMD - LEBL	A. S. MADRID-BARAJAS - BARCELONA/EL PRAT	482
2	LEBL - LEPA	BARCELONA/EL PRAT - PALMA DE MALLORCA	202
3	LEMD - LEPA	A. S. MADRID-BARAJAS - PALMA DE MALLORCA	547
4	LEMD - GCLP	A. S. MADRID-BARAJAS - GRAN CANARIA	1.765
5	LEBL - EGKK	BARCELONA/EL PRAT - LONDON GATWICK	1.108
6	LEPA - EDDL	PALMA DE MALLORCA - DÜSSELDORF	1.341
7	LEMD - LPPT	A. S. MADRID-BARAJAS - LISBOA	513
8	LEMD - EGLL	A. S. MADRID-BARAJAS - LONDON HEATHROW	1.244
9	LEMD - GCXO	A. S. MADRID-BARAJAS - TENERIFE NORTE	1.771
10	LEBL - LIRF	BARCELONA/EL PRAT - ROMA/FIUMICINO	847
11	LEBL - EHAM	BARCELONA/EL PRAT - AMSTERDAM/SCHIPHOL	1.240
12	LEMD - LFPO	A. S. MADRID-BARAJAS - PARIS-ORLY	1.027
13	LEBL - LFPG	BARCELONA/EL PRAT - PARIS-CHARLES DE GAULLE	858
14	LEMD - LIRF	A. S. MADRID-BARAJAS - ROMA/FIUMICINO	1.330
15	LEBL - LEIB	BARCELONA/EL PRAT - IBIZA	276
16	LEBL - LFPO	BARCELONA/EL PRAT - PARIS-ORLY	826
17	LEPA - EDDF	PALMA DE MALLORCA - FRANKFURT/MAIN	1.250
18	LEMD - EHAM	A. S. MADRID-BARAJAS - AMSTERDAM/SCHIPHOL	1.458
19	LEMG - EGKK	MALAGA/COSTA DEL SOL - LONDON GATWICK	1.644
20	LEMD - LFPG	A. S. MADRID-BARAJAS - PARIS-CHARLES DE GAULLE	1.062

*Tabla 5-1: Top 20 rutas de España por volumen de pasajeros en 2019 y su etapa en kilómetros. Elaboración propia con datos de Eurostat.*

Vale la pena destacar en primer lugar las rutas más cortas, los vuelos de Barcelona a Palma de Mallorca y a Ibiza, de 202 y 276 kilómetros respectivamente. Estas rutas se consideran como de muy corto alcance de acuerdo con la clasificación que plantea Eurocontrol. Aunque la conexión alternativa sería un ferry que tarda al menos 5 horas hasta Mallorca y en torno a 8 horas a Ibiza.

En segundo lugar, las rutas de entre 500 y 1000 kilómetros como son la ruta Madrid – Lisboa o la ruta Barcelona – París. Algunos ejemplos de rutas de entre 1000 y 1500 kilómetros serían de Madrid a París, de Barcelona a Ámsterdam o de Mallorca a Frankfurt.

Prestando atención a aquellas rutas que Eurocontrol clasifica como de medio alcance, aquellas de 1500 a 4000 kilómetros, se pueden destacar los vuelos entre Madrid y las islas Canarias, Gran Canaria y Tenerife, o el trayecto de Málaga a Londres. Sin embargo, no hay ninguna ruta de más de 1800

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

kilómetros entre las 20 con mayor volumen de pasajeros. Esto evidencia que las 20 rutas con mayor volumen de pasajeros en España son mayoritariamente de corto alcance.

Si se analizan las 20 rutas con mayor número de vuelos aparecen algunas que no se encontraban en la lista anterior. Se entiende que, por tanto, estas rutas utilizan aeronaves pequeñas y transportan pocos pasajeros. También se podría suponer que en las rutas que veíamos en la tabla anterior utilizan aviones grandes, de pasillo doble, y por tanto transportan un gran número de viajeros, pero se descarta esta hipótesis porque, de acuerdo con lo visto en este trabajo, no es lo habitual en rutas de menos de 200 kilómetros



*Figura 5.8 Top 20 rutas de España por número de vuelos en 2019. Elaboración propia con datos de Eurostat, utilizando [www.gcmmap.com](http://www.gcmmap.com).*

Entre las rutas que se encuentran en esta Tabla 5-2 y no se encontraban entre las 20 rutas con mayor volumen de pasajeros, destacan las conexiones entre

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

los principales aeropuertos de las islas Canarias y de las islas Baleares. Es decir, los vuelos de Gran Canaria a Tenerife Norte o de Mallorca a Ibiza.

Entre estas rutas, once de ellas son de vuelos de muy corto alcance y solo dos se pueden considerar como de medio alcance: Madrid – Gran Canaria y Madrid – Tenerife Norte.

Ranking	Ruta OACI	Ruta	Etapas (km)
1	GCLP - GCXO	GRAN CANARIA - TENERIFE NORTE	112
2	LEMD - LEBL	A. S. MADRID-BARAJAS - BARCELONA/EL PRAT	482
3	LEBL - LEPA	BARCELONA/EL PRAT - PALMA DE MALLORCA	202
4	GCLA - GCXO	LA PALMA - TENERIFE NORTE	139
5	GCLP - GCRR	GRAN CANARIA - LANZAROTE	207
6	LEMD - LEPA	A. S. MADRID-BARAJAS - PALMA DE MALLORCA	547
7	GCFV - GCLP	FUERTEVENTURA - GRAN CANARIA	160
8	LEMD - LPPT	A. S. MADRID-BARAJAS - LISBOA	513
9	LEBL - EGKK	BARCELONA/EL PRAT - LONDON GATWICK	1.108
10	LEIB - LEPA	IBIZA - PALMA DE MALLORCA	140
11	LEPA - EDDL	PALMA DE MALLORCA - DÜSSELDORF	1.341
12	LEMD - EGLL	A. S. MADRID-BARAJAS - LONDON HEATHROW	1.244
13	LEMD - GCLP	A. S. MADRID-BARAJAS - GRAN CANARIA	1.765
14	LEBL - LIRF	BARCELONA/EL PRAT - ROMA/FIUMICINO	847
15	LEMD - LPPR	A. S. MADRID-BARAJAS - PORTO	438
16	LEBL - LFPG	BARCELONA/EL PRAT - PARIS-CHARLES DE GAULLE	858
17	LEBL - LEIB	BARCELONA/EL PRAT - IBIZA	276
18	LEBL - EHAM	BARCELONA/EL PRAT - AMSTERDAM/SCHIPHOL	1.240
19	LEMD - GCXO	A. S. MADRID-BARAJAS - TENERIFE NORTE	1.771
20	LEMD - LFPO	A. S. MADRID-BARAJAS - PARIS-ORLY	1.027

*Tabla 5-2: Top 20 rutas de España por número de vuelos en 2019 y su etapa en kilómetros.  
Elaboración propia con datos de Eurostat.*

Ante estos datos, que resaltan la gran cantidad de vuelos de muy corto alcance que existen en España, es importante poner el foco en qué tipo de aeronave se utiliza para los mismos.

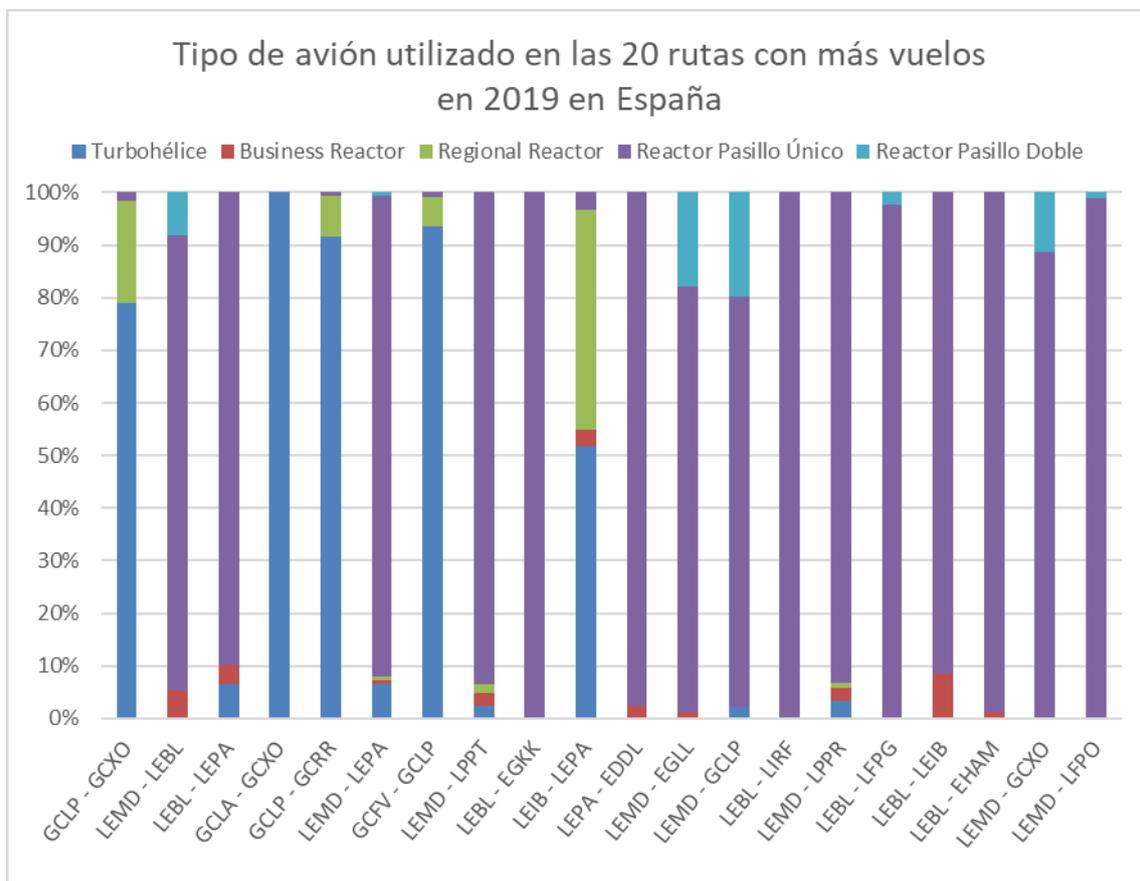
Los vuelos de muy corto alcance tradicionalmente se han considerado como muy malos en la lucha contra el cambio climático (debido al elevado gasto de combustible que implican las maniobras de despegue y aterrizaje) y algunos gobiernos, como el francés, han impuesto medidas para prohibirlos.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> <https://www.traveler.es/articulos/francia-prohibe-los-vuelos-cortos>

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Este debate está más presente en aquellos trayectos que presentan una alternativa en tren con una duración razonable. En cambio, para los vuelos entre islas, por las características del transporte marítimo, no se ha generalizado esta mentalidad de poner fin a los vuelos de muy corto alcance.

De todas formas, merece la pena poner atención en la Figura 5.9, donde se ve qué tipo de aeronave se utiliza en estas rutas. Las rutas entre islas utilizan mayoritariamente aviones turbohélice y reactores regionales.



*Figura 5.9 Tipo de avión utilizado en las 20 rutas con más vuelos en España en 2019. Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.*

Las ventajas en utilizar este tipo de aeronave para este tipo de rutas se pueden ver en la Figura 5.14, en los próximos apartados.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

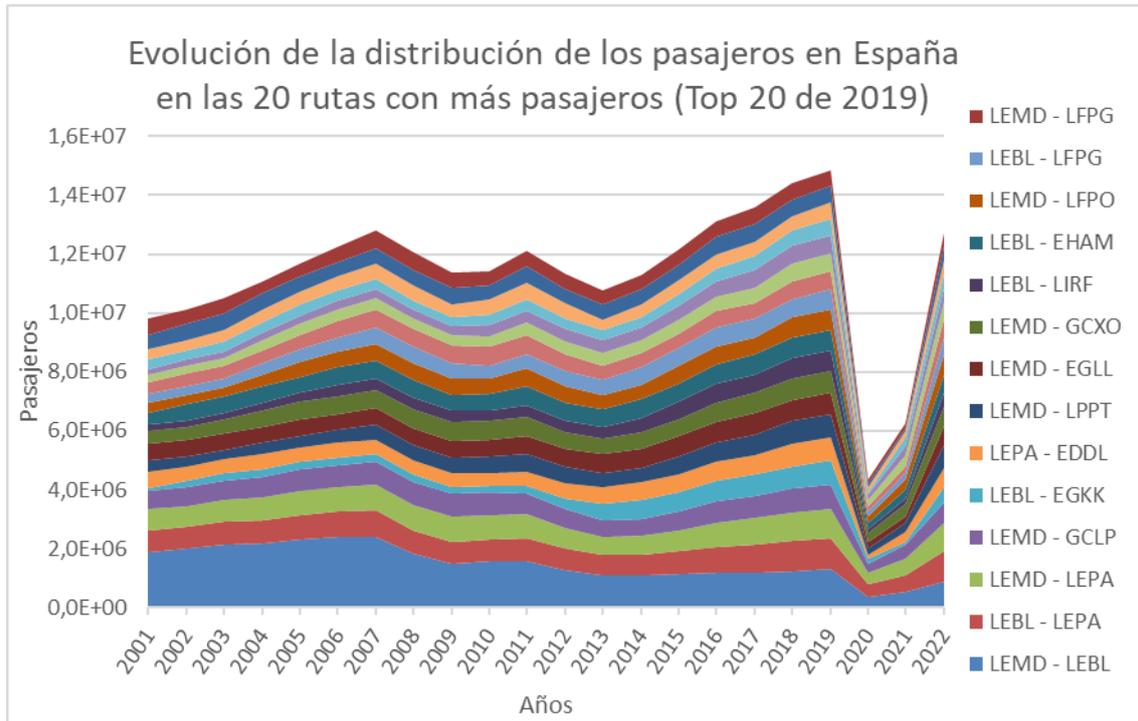


Figura 5.10 Evolución de la distribución de los pasajeros en España en las 20 rutas con más pasajeros (Top 20 de 2019).

Elaboración propia con datos de Eurostat.

### 5.1.3 Tipos de aeronave y de propulsión

En este apartado se va a estudiar los vuelos clasificados por el tipo de propulsión que utilizan y el tamaño de la aeronave. Se distingue entre dos tipos de propulsión: turbohélices y turborreactores (comúnmente llamados reactores o *jet*). Dentro de los tamaños de aeronaves se distingue de más pequeño a más grande entre: regional, pasillo único y pasillo doble.

Los turbohélices solo pueden ser utilizados para velocidades de vuelo subsónicas bajas, hasta Mach 0,6. Esto se debe a las grandes velocidades relativas hélice-aire que se producen en el extremo exterior de las palas debido

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

al giro de estas, que producen una caída de rendimiento por efectos de compresibilidad y la hélice deja de producir tracción.<sup>21</sup>

Sin embargo, los pasajeros prefieren que sus vuelos sean lo más cortos posibles y, por tanto, que los aviones vuelen más rápido. La mayoría de los aviones comerciales impulsados por turborreactores utilizan turbofanés. La velocidad de vuelo habitual de un turbofán está en torno a Mach 0,8.

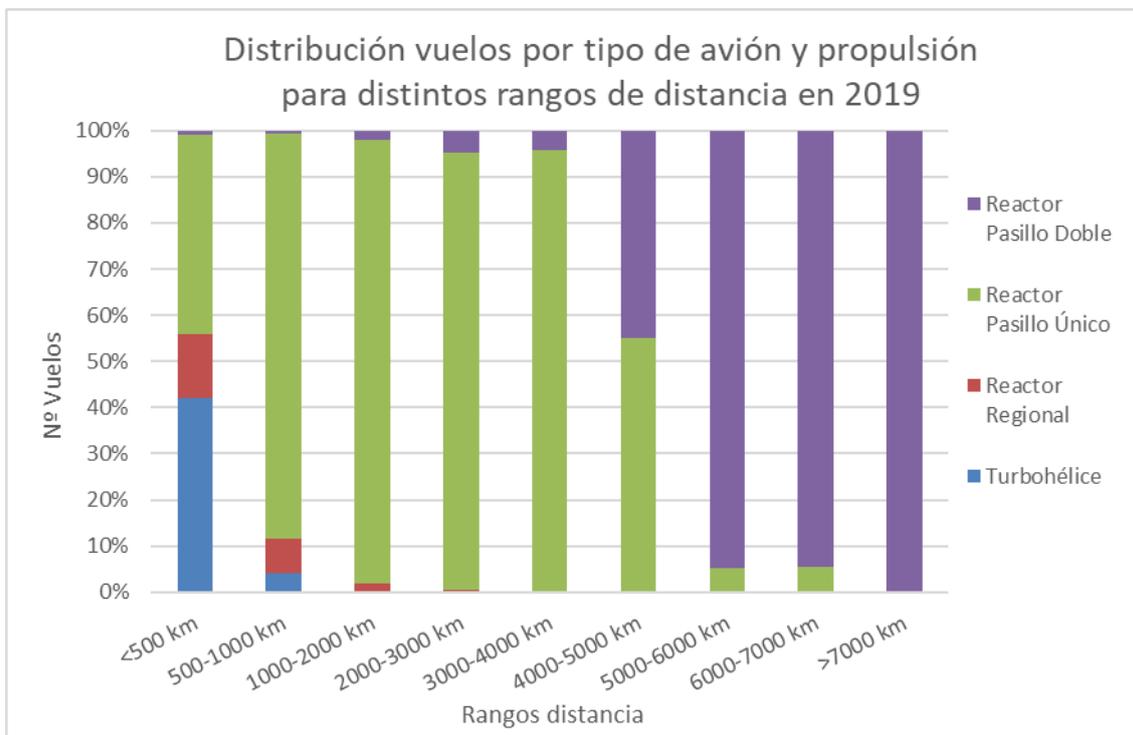


Figura 5.11 Distribución vuelos por tipo de avión y tipo de propulsión para distintos rangos de distancia en España en 2019.

Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

En la Figura 5.11 se refleja que porcentaje de los vuelos, para un determinado rango de distancias, utiliza cada tipo de avión. Este gráfico se ha elaborado con los datos de los vuelos de España en 2019.

<sup>21</sup> Aerorreactores (Septiembre, 2019) J. L. Montañés. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio.*

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Para vuelos de menos de 500 kilómetros, un 42% de los vuelos utilizaron aviones turbohélice, casi los mismos que reactores de pasillo único, y un 14% aviones reactores regionales.

Para aquellos vuelos entre 500 y 1000 kilómetros, el porcentaje conjunto de aviones turbohélice y reactores regionales fue en torno a un 10%. Frente a los vuelos de reactor de pasillo único, un 88%.

Los aviones de reactor de pasillo doble se utilizaron en el 45% de los vuelos de 4000 a 5000 kilómetros y en prácticamente todos los vuelos de más de 5000 kilómetros. El resto de los vuelos se realizaron con aviones de reactor de pasillo único. El 81% de los vuelos de España en 2019 se hicieron con aviones de reactor de pasillo único.

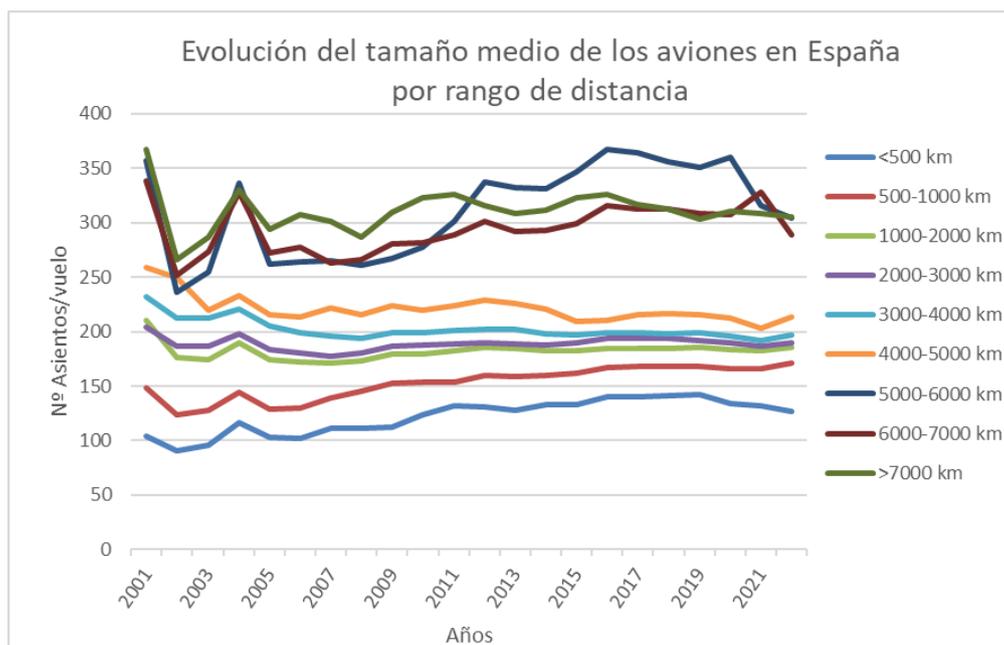


Figura 5.12 Evolución del tamaño medio de los aviones en España por rango de distancia  
Elaboración propia con datos de Eurostat.

Un turbohélice típico, como es el ATR-72 tiene entre 64 y 68 asientos. Los aviones reactores regionales tienen desde 50 a 100 sitios, dependiendo del modelo. El CRJ-200 tiene 50 asientos<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> <https://www.iberia.com/>

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Un avión de pasillo único convencional tiene algo menos de 200 asientos. Por ejemplo, el A320 neo tiene entre 180 y 186 asientos y el A321 hasta 200. Un avión de pasillo doble tradicional tiene entre 300, como el A330, y 350 asientos, como el A350<sup>23</sup>. Aunque un A380 puede tener desde 484 a 615 asientos dependiendo de cuantas clases de billete ofrezca<sup>24</sup>.

Teniendo en cuenta los tamaños típicos mencionados arriba, la Figura 5.12 refleja muy bien el tamaño de los aviones que predominaban en la Figura 5.11.

---

<sup>23</sup> <https://www.iberia.com/>

<sup>24</sup> <https://www.emirates.com/>

## 5.2 Combustible y CO<sub>2</sub>

En esta sección se analiza los datos que caracterizan el impacto ambiental de la aviación y se caracterizan de acuerdo con la estructura del transporte aéreo que se ha explicado en el apartado anterior.

La información que mejor caracteriza el impacto ambiental del transporte aéreo es el factor de eficiencia. Como se mostró con la ecuación (4.19), este factor es el resultado de dividir el combustible total anual entre los PKTs (Pasajeros por Kilómetro Transportados) anuales. Corresponde con el combustible por unidad de pasajero y kilómetro. El impacto ambiental será menor cuanto más pequeño sea el factor de eficiencia.

De acuerdo con la Figura 5.13, las rutas menos eficientes son las de muy corto alcance, las de menos de 500 kilómetros, como cabía esperar. En segundo y tercer lugar se encuentran las rutas de entre 500 y 1000 kilómetros y las de más de 7000 kilómetros.

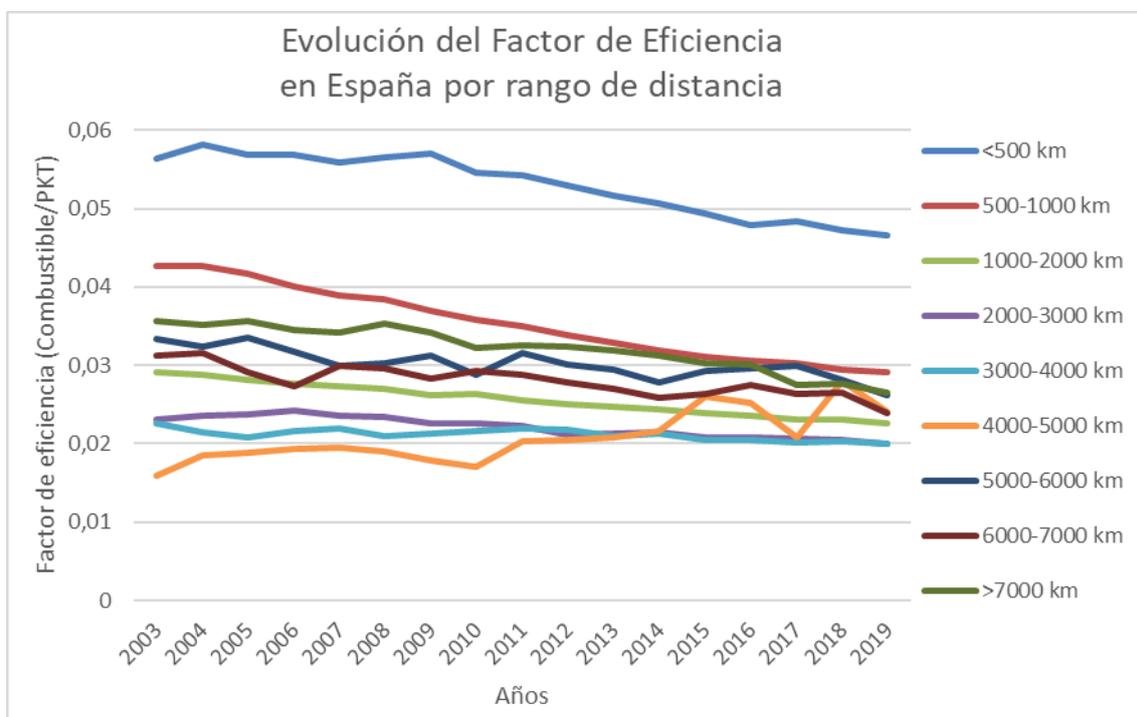


Figura 5.13 Evolución del Factor de Eficiencia en España por rango de distancia. Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Estos resultados se pueden comparar con lo observado en la Figura 5.11 y con la Figura 9.4 y Figura 9.5, que aporta la misma información para 2003 y 2011. De tal forma que se puede ver qué tipo de avión se ha utilizado a lo largo del período de estudio.

Si se comparan estos tres gráficos se puede justificar el empeoramiento del factor de eficiencia, a un 3,4% medio anual, en los vuelos de 4000 a 5000 kilómetros. En 2003 más del 95% de estos vuelos se realizaron con aviones de reactor de pasillo único. En 2011, este porcentaje bajó en torno al 75% en favor de los aviones de reactor de pasillo doble. Y en 2019 el 45% de estos vuelos se realizaron con reactor de pasillo doble.

Teniendo en cuenta los datos de la Figura 5.3, el número de vuelos de entre 4000 a 5000 kilómetros en este trabajo es prácticamente despreciable si lo comparamos con el número de vuelos en otros rangos de distancias. Por lo que sería interesante estudiar de cara a un trabajo futuro, con una muestra mayor de vuelos de este tipo si se dan estas tendencias. Este rango de distancias es el único que tiene un factor de eficiencia peor cada año. Además, sería interesante averiguar si este cambio en la flota a lo largo de los años está justificado solo por intereses económicos de las aerolíneas o interviene algún otro factor.

El factor de eficiencia para cada modelo de avión se representa en la Figura 5.14, se ha obtenido a partir de los datos de vuelos que salieron de España en 2019. Se obtienen los resultados esperables, de menos a mayor factor de eficiencia se encuentran los turbohélices, los reactores regionales, los reactores de pasillo único y los reactores de pasillo doble.

Además, el factor de eficiencia mejora a mayor rango de distancias porque, aunque aumenta el combustible consumido, aumenta también el número de kilómetros y el número de pasajeros, suponiendo que se utilizan aviones más grandes, de acuerdo con los datos obtenidos anteriormente.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

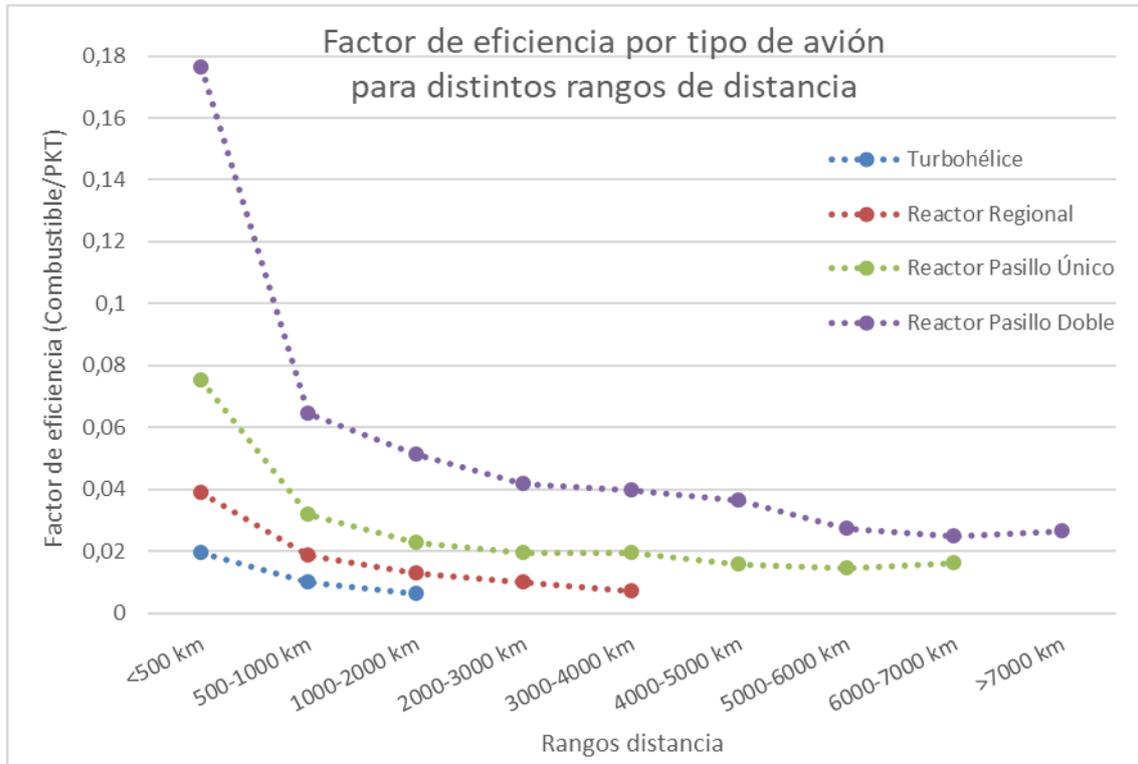


Figura 5.14 Factor de eficiencia por tipo de avión para distintos rangos de distancia en España en 2019.

Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

Hay que tener en cuenta que los aviones turbohélice tienen un alcance máximo de entre 1000 y 2500 kilómetros y son más lentos que los aviones a reacción, como se ha explicado en la sección 5.1.3. Los reactores regionales tienen un alcance máximo de 2000 a 4000 kilómetros.

### 5.3 Pasajeros y actividad económica

La relación entre los pasajeros por kilómetro transportados y el PIB real per cápita se puede ver en la Figura 5.15. Se puede observar un crecimiento más o menos lineal desde 2001 a 2008 tanto para el PIBr<sub>pc</sub> como para los PKTs. Tras la crisis de 2008 los valores de PIBr<sub>pc</sub> caen, pero los PKTs se mantienen hasta 2014. El crecimiento vuelve en 2015 cuando los valores de las dos variables crecen conjuntamente hasta 2019. En 2020 ambas variables caen drásticamente por la crisis provocada por el Covid-19. Finalmente, los valores de 2022 indican que se están recuperando los valores de 2019 y comienza una época de crecimiento tanto para la economía española como para el tráfico aéreo.

En 2020 ambas variables caen drásticamente por la crisis provocada por el Covid-19. Finalmente, los valores de 2022 indican que se están recuperando los valores de 2019 y comienza una época de crecimiento tanto para la economía española como para el tráfico aéreo.

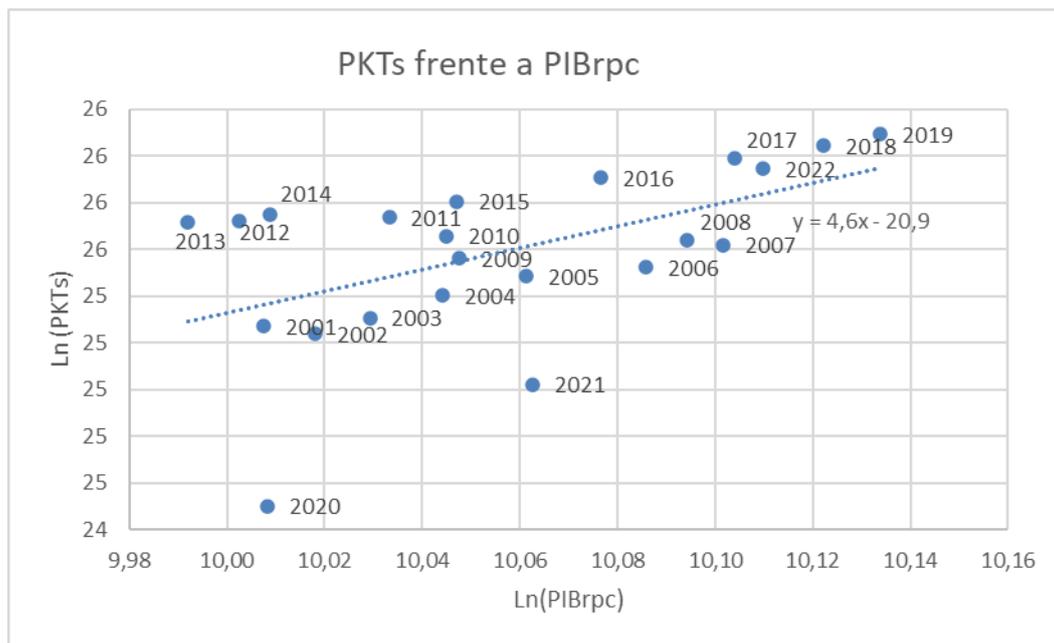


Figura 5.15 PKTs frente a PIB<sub>r<sub>pc</sub></sub> en España de 2001 a 2022.  
Elaboración propia con datos de Eurostat.

## 6. Energía y emisiones

El propósito de esta sección consiste en analizar la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y las variables que se consideran determinantes en su evolución.

Entre estos factores, se encuentran el número de vuelos, la antigüedad de la flota y la etapa media. Por otra parte, en términos de eficiencia, se explorarán el factor de ocupación, el tamaño del avión (medido por la cantidad de asientos por vuelo) y de nuevo, la etapa media.

Para realizar este análisis, se cuenta con datos organizados en categorías a lo largo de los 17 años del estudio, generando un total de 315 observaciones. En este estudio, no se tendrá en cuenta la dimensión temporal debido a la falta de información sobre la antigüedad de las aeronaves y las mejoras aerodinámicas que pudieran influir en las emisiones. La consideración de la variable temporal queda pendiente para investigaciones futuras.

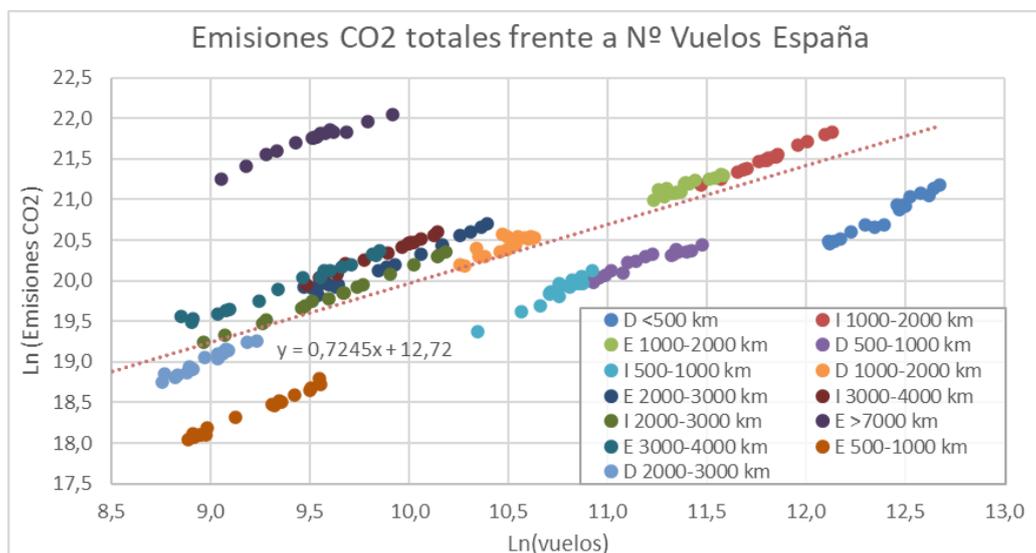


Figura 6.1 Emisiones CO<sub>2</sub> totales frente a número de vuelos en España de 2003 a 2019 por tipo de vuelo y rango de distancias.

Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

La relación entre emisiones de CO<sub>2</sub> totales y el número de vuelos se muestra en la Figura 6.1. En esta gráfica se distingue que los vuelos quedan agrupados por rangos de distancias en franjas prácticamente paralelas a la línea de tendencia global.

### Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

A la derecha del gráfico se sitúan aquellas categorías con un volumen mayor de vuelos y en la zona superior las que más emisiones tienen. Hay que tener en cuenta que las emisiones son proporcionales al consumo de combustible y no están divididas ni por pasajeros, ni por kilómetros, ni por número de vuelos. Con lo cual a mayor número de vuelos y más kilómetros mayores serán las emisiones.

Resalta que la cantidad total de emisiones es prácticamente la misma para los vuelos de más de 7000 kilómetros, muy largos y poco numerosos, que para los vuelos de entre 1000 y 2000 kilómetros, más cortos y muy numerosos. Los vuelos de menos de 500 kilómetros aportan un poco menos al total de las emisiones a pesar de que son los más abundantes.

	Ln (Emisiones CO2)
Constante	12,72 (0,352)
Ln (vuelos)	0,7474
Estadístico F	396
Nº Observaciones	315
R <sup>2</sup>	0,557

*Tabla 6-1: Valores ecuación de regresión emisiones de CO2 totales frente a número de vuelos.  
Elaboración propia.*

Cómo depende el tamaño del avión escogido en función de la distancia que vaya a volar se ve en la Figura 6.2. Hay que tener en cuenta que las distintas categorías se ven como líneas horizontales porque la etapa media va a ser prácticamente la misma, ya se ha calculado como la media de las distancias recorridas por los vuelos de esa categoría.

Como cabía esperar, los vuelos más cortos utilizan aviones más pequeños y los aviones más grandes se usan para rutas más largas, ver puntos para vuelos domésticos de menos de 500 kilómetros y puntos de extracomunitarios de más de 7000 kilómetros. La nube de puntos central indica que el tamaño de los vuelos de entre 1000 y 7000 kilómetros es muy similar.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

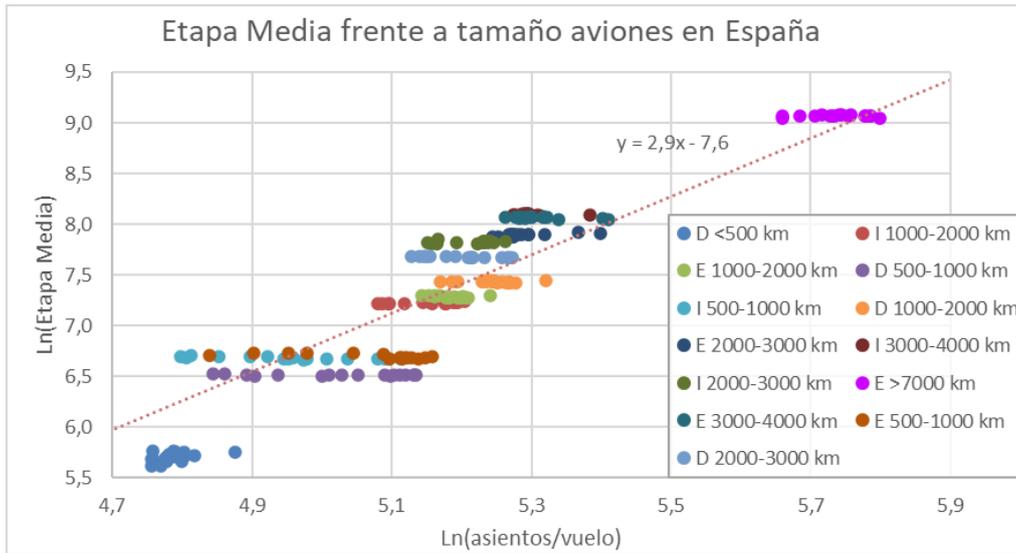


Figura 6.2 Etapa media frente a tamaño de aviones en España de 2003 a 2019 por tipo de vuelo y rango de distancias.

Elaboración propia con datos de Eurostat.

La relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> medias y el factor de eficiencia se ve en la Figura 6.3. En este gráfico para un mismo valor del factor de eficiencia se dan dos valores para las emisiones medias.

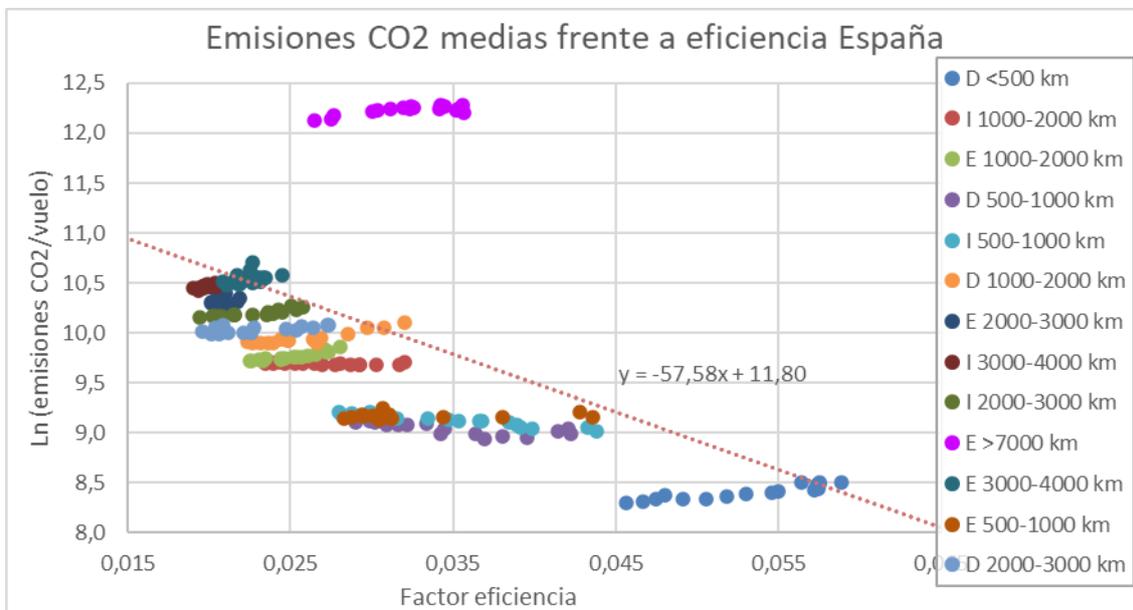


Figura 6.3 Emisiones CO<sub>2</sub> medias frente a eficiencia, en España de 2003 a 2019 por tipo de vuelo y rango de distancias.

Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

Como consecuencia los vuelos de más de 7000 kilómetros tienen el mismo factor de eficiencia que los vuelos de 500 a 1000 kilómetros. Los vuelos más largos tienen unas emisiones por vuelo muy altas, pero el factor de eficiencia es peor que para otros vuelos largos porque, aunque transportan una gran cantidad de pasajeros (aviones más grandes) y recorren muchos kilómetros las cantidades de combustible consumido son mucho más grandes.

En la Figura 6.4, aparece la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> medias y la ocupación de los vuelos. Los datos se agrupan por categorías horizontalmente porque tienen emisiones medias similares. El factor de ocupación si que varía más dentro de las categorías.

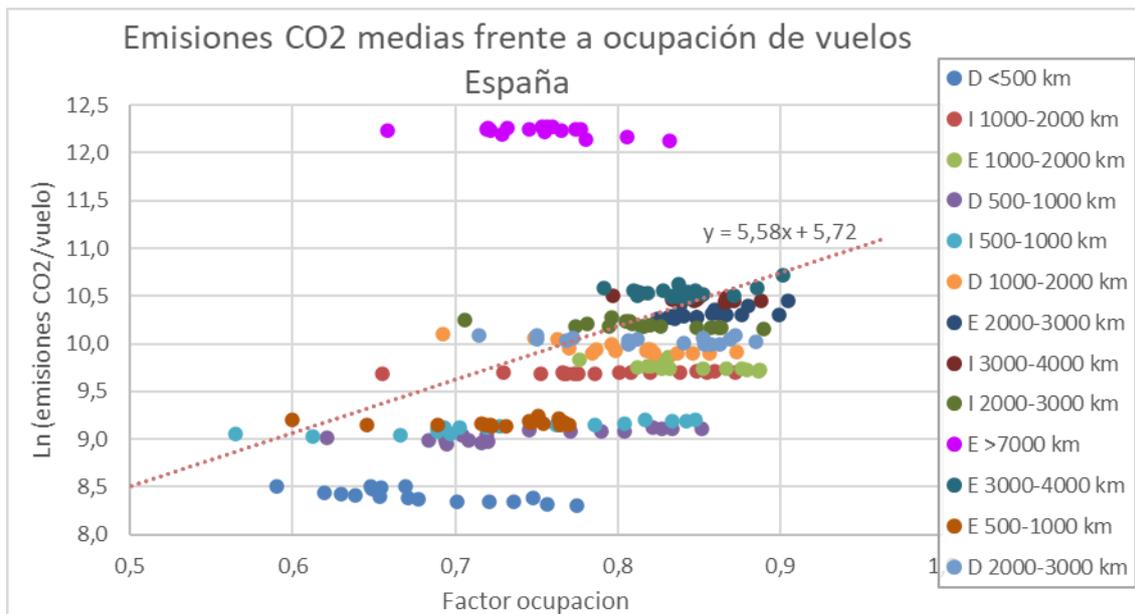


Figura 6.4 Emisiones CO<sub>2</sub> medias frente a factor de ocupación de los vuelos, en España de 2003 a 2019 por tipo de vuelo y rango de distancias.

Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

En la Figura 9.7, se puede apreciar cómo la etapa media influye en las emisiones promedio de CO<sub>2</sub>. Como era se podía esperar, los datos indican una relación lineal entre las emisiones promedio y la etapa media; en otras palabras, a medida que la etapa media aumenta, las emisiones de CO<sub>2</sub> por vuelo también aumentan. Vale la pena señalar que la distribución de los datos no es continua; se observan agrupamientos de puntos a lo largo de la línea de

### Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

regresión. Esto se debe a que el valor de la etapa media se sitúa aproximadamente en el punto medio del rango de distancias en kilómetros.

En todos estos gráficos las rectas de regresión quedan muy alteradas por los valores que se salen de las tendencias generales. En muchos casos, como se ha visto estas alteraciones las marcan los vuelos de más de 7000 kilómetros.

## **7. Propuestas de política energética y posibles impactos**

En esta sección, se analizan las principales propuestas de política energética y climática en el contexto del impacto de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte aéreo y cómo abordar este desafío.

Los Combustibles de Aviación Sostenibles (SAF), también conocidos como Biocombustibles de Aviación, representan la principal estrategia de la Unión Europea para la descarbonización de la aviación. Estos combustibles se producen de manera sostenible y tienen un menor impacto ambiental en comparación con los combustibles tradicionales de aviación, como el keroseno. Sin embargo, un desafío clave radica en su elevado costo actual. Los SAF son entre dos y ocho veces más caros que el combustible de aviación tradicional. Esta disparidad genera incertidumbre en el sector, y se requieren mecanismos para reducir los precios y hacer que los SAF sean más asequibles.

Además de los costos, la disponibilidad de materias primas es otra preocupación. Los SAF se pueden dividir en dos categorías: los Bio-SAF, producidos a partir de materias primas vegetales o animales, y los SAF sintéticos, elaborados a partir de hidrógeno con bajo contenido de CO<sub>2</sub>. Aunque los Bio-SAF son más económicos, su oferta es limitada y podría volverse más costosa a medida que se agoten las materias primas. Por otro lado, los SAF sintéticos, aunque prometedores, enfrentan desafíos tecnológicos y de costo en su producción. Se espera que los SAF sintéticos sean más asequibles y ampliamente disponibles hacia 2050.

La demanda de los clientes, tanto de ocio como corporativos, desempeñará un papel crucial en la reducción de emisiones. Los pasajeros de ocio a menudo priorizan las tarifas bajas y pueden ser reacios a asumir costos adicionales para reducir emisiones. En contraste, las empresas corporativas y tecnológicas están bajo presión para reducir las emisiones de sus viajes y transporte de

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

mercancías, lo que podría impulsar la demanda de vuelos con menores emisiones.

Para fomentar la adopción de SAF y la descarbonización en la aviación, se requieren incentivos políticos. Estos pueden incluir mandatos de mezcla de combustibles, contratos de diferencias, créditos fiscales y políticas de fijación de precios o impuestos sobre los combustibles fósiles. Los offsets, que permiten a los pasajeros compensar sus emisiones mediante la inversión en proyectos de reducción de gases de efecto invernadero, también son una opción. Sin embargo, la percepción de baja calidad y la falta de transparencia en los offsets limitan su aceptación y efectividad.

En resumen, abordar el impacto de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte aéreo requiere un enfoque integral que involucre la reducción de costos de los SAF, la promoción de tecnologías sostenibles y la creación de incentivos tanto para los pasajeros como para las aerolíneas. La colaboración entre sectores y la cooperación internacional son esenciales para avanzar hacia una aviación más sostenible y con bajas emisiones de carbono.

## 8. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se ha estudiado la estructura del transporte aéreo en España entre 2001 y 2022, así como, la eficiencia de las rutas de la aviación comercial en el país y el impacto ambiental de las mismas. Cuando es necesario, el trabajo se centra en el período de 2003 a 2019 para aislar el efecto de la pandemia de la Covid-19, que necesitaría un tratamiento específico.

En cuanto a la estructura del tráfico aéreo en España

- El tráfico aéreo doméstico en España ha disminuido del 58% en 2001 al 42% en 2019, en favor del crecimiento del tráfico aéreo dentro de la Unión Europea, que fue de un 23% en 2019.
- Por tramos de distancia, los vuelos más numerosos en la actualidad son los de 1000 a 2000 kilómetros, que en 2011 superaron a los de menos de 500 kilómetros, que habían sido los más abundantes desde 2001.
- Madrid, Barcelona y Palma de Mallorca son los aeropuertos origen de en torno al 55% de los pasajeros totales que salen de España.
- Las veinte rutas más numerosas en España en 2019, tanto por número de vuelos como por volumen de pasajeros, son de menos de 2000 kilómetros. Por número de pasajeros destacan las conexiones entre los principales aeropuertos españoles: Madrid – Barcelona, Barcelona – Mallorca y Madrid - Mallorca
- Once de las veinte rutas con mayor número de vuelos en España en 2019 son de muy corto alcance, es decir, de menos de 500 kilómetros. Aunque en cinco de ellas, en concreto las que realizan conexiones entre islas, se utilizan mayoritariamente aviones más eficientes: turbohélices y reactores regionales.
- Por rangos de distancia para los vuelos en España en 2019:
  - Un 40% de los vuelos de menos de 500 kilómetros utilizaron aviones turbohélice y un 10% reactores regionales.
  - Para los vuelos de entre 500 y 1000 kilómetros, el porcentaje de aviones turbohélice y reactores regionales fue en torno a un 10%.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

- Los aviones de reactor de pasillo doble se utilizaron en el 45% de los vuelos de 4000 a 5000 kilómetros y en prácticamente todos los vuelos de más de 5000 kilómetros.
- El resto de los vuelos se realizaron con aviones de reactor de pasillo único.

En cuanto a los factores de eficiencia del tráfico aéreo en España:

- Teniendo en cuenta que el factor de eficiencia se calcula como combustible entre pasajeros por kilómetro, los tipos de avión de mejor a peor eficiencia para cualquier rango de distancias son: turbohélice, reactor regional, reactor de pasillo único y reactor de pasillo doble (ver Figura 5.14).
- El factor de eficiencia de los vuelos en España de 2003 a 2019 ha mejorado en casi un 13%, a una tasa de casi un 1% anual. La mayor mejora ha sido para los vuelos de 500 a 1000 kilómetros, en los que el factor de eficiencia ha disminuido en más de un 30% desde 2003, a un 2,3% anual. Las rutas de más de 6000 kilómetros han mejorado su eficiencia en casi un 25%.
- Aunque la muestra de vuelos de 4000 a 5000 kilómetros en este estudio es pequeña, cabe destacar que el factor de eficiencia ha empeorado un 50% de 2003 a 2019, a un 3,4% medio anual. Es el único rango de distancias que presenta un aumento del factor de eficiencia. Esto se justifica por el cambio de la flota utilizada, en 2003 se utilizaban en casi el 100% de estos vuelos reactores de pasillo único, pero ha ido cambiando hasta 2019, realizando el 45% de estos vuelos con reactores de pasillo doble.

Las mejoras del factor de eficiencia se justifican por las renovaciones de flota que se han hecho a lo largo de los años, incluyendo motores más eficientes, aviones con mejoras aerodinámicas y materiales más ligeros que, por tanto, tienen un menor consumo de combustible.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

La relación entre emisiones de CO<sub>2</sub> totales y el número de vuelos demuestra que la cantidad total de emisiones para los vuelos de más de 7000 kilómetros, muy largos y poco numerosos, es prácticamente la misma que para los vuelos de entre 1000 y 2000 kilómetros, más cortos y muy numerosos.

En cuanto a la relación entre las emisiones medias de CO<sub>2</sub> y el factor de eficiencia destaca que para un mismo valor de eficiencia se dan dos valores para las emisiones medias: para los vuelos de más de 7000 kilómetros y para aquellos de entre 500 y 1000 kilómetros.

Es en estas condiciones que se describen en el trabajo en las que se afronta el objetivo ambiental principal del sector: tener emisiones netas cero para 2050. Las medidas que se van a implantar ahora en la Unión Europea exigen incrementar el uso de los combustibles de aviación sostenibles (SAF). Estos combustibles pueden suponer una reducción de las emisiones en hasta un 80% en todo el ciclo de vida. Pero antes hay que destinar muchos recursos para tener acceso a las materias primas, escalar la producción y así reducir los costes. Otros desarrollos en los que hay que seguir invirtiendo para descarbonizar la aviación son el hidrógeno verde, así como las mejoras aerodinámicas de los aviones y mayor eficiencia de los motores.

Además de las nuevas medidas que se van a implementar desde la Unión Europea, cabe destacar como factor fundamental las iniciativas en favor de la modernización de la gestión del tráfico aéreo como vector para la reducción de emisiones, impulsadas desde organismos como Eurocontrol y SESAR. Optimizar el espacio aéreo y utilizar nuevas tecnologías basadas en funcionalidades como PBN<sup>25</sup> o *free route*, implicará que se realicen rutas más directas y operaciones más eficientes. Esto puede ahorrar muchos kilómetros y tiempos de espera para las aeronaves, lo que se traduce en menor gasto de combustible y menos emisiones de CO<sub>2</sub>.

---

<sup>25</sup> Performance Based Navigation

## **8.1 Interacción entre elementos técnicos y económicos**

De cara a un análisis futuro estaría bien tener datos sobre los mecanismos de precios que utilizan las aerolíneas. De esta forma se podría medir, teniendo en cuenta la elasticidad de la demanda para los billetes de avión, cómo afectarían las distintas medidas de política energética y climática. Es decir, cuánto del sobrecoste que tiene la aviación sostenible para las aerolíneas están dispuesto a asumirlo los pasajeros o las empresas que utilizan el transporte aéreo.

## 9. ANEXOS

### Anexo 1: Otros gráficos

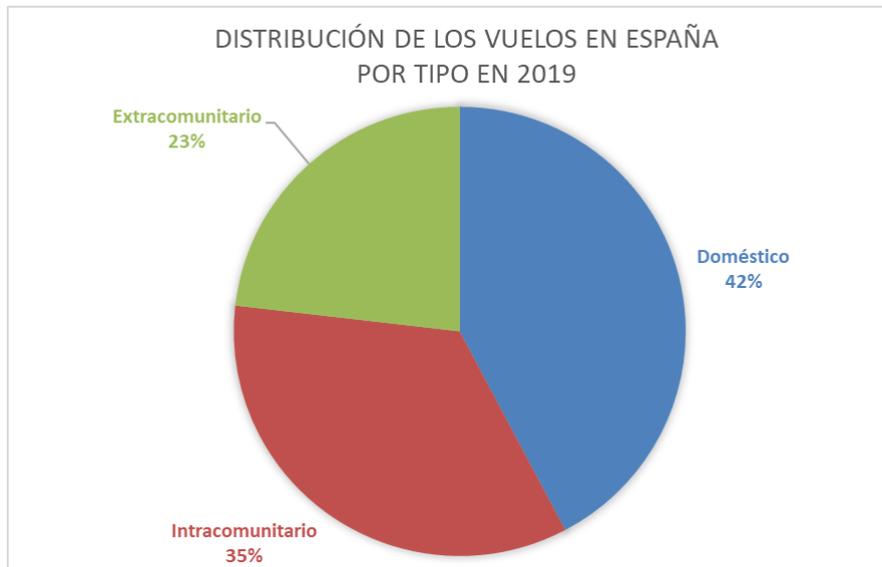
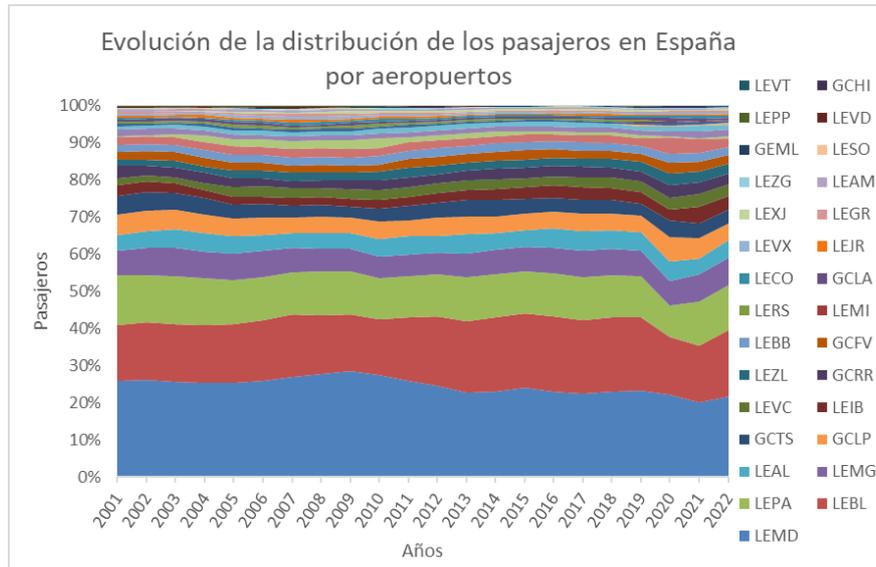


Figura 9.1 Distribución del total de vuelos en España por tipo de conexión en 2019.  
Elaboración propia con datos de Eurostat.



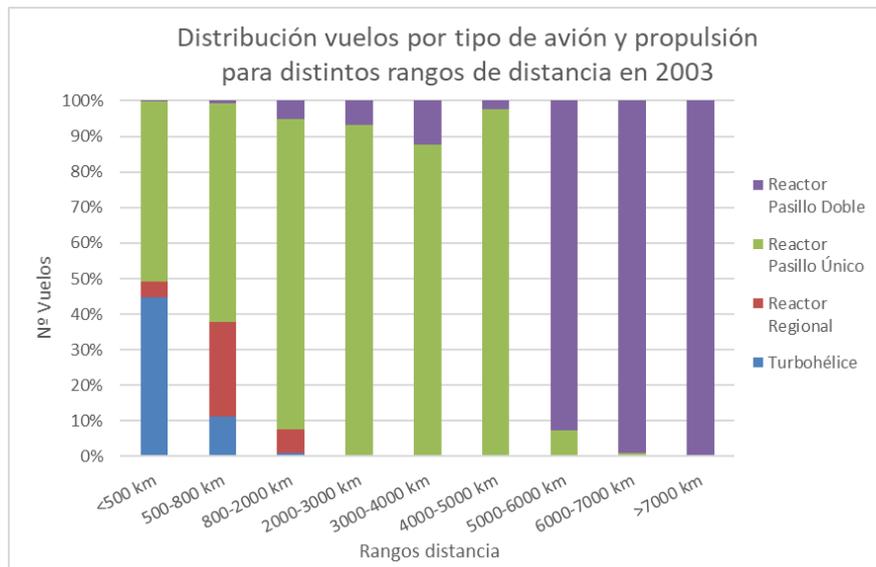
Figura 9.2 Distribución del total de vuelos en España por tipo de conexión en 2001.  
Elaboración propia con datos de Eurostat.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación



*Figura 9.3 Evolución de la distribución del porcentaje de pasajeros en España por aeropuertos. Elaboración propia con datos de Eurostat.*

Legenda: 'LEMD' i.e. Madrid, 'LEBL' i.e. Barcelona, 'LEPA' i.e. Palma De Mallorca, 'LEMG' i.e. Málaga, 'LEAL' i.e. Alicante, 'GCLP' i.e. Gran Canaria, 'GCTS' i.e. Tenerife Sur, 'LEIB' i.e. Ibiza, 'LEVC' i.e. Valencia, 'GCRR' i.e. Lanzarote, 'LEZL' i.e. Sevilla, 'GCFV' i.e. Fuerteventura, 'LEBB' i.e. Bilbao, 'GCXO' i.e. Tenerife Norte, 'LEGE' i.e. Girona, 'LEMH' i.e. Menorca, 'LEST' i.e. Santiago, 'LEMI' i.e. Murcia, 'LEAS' i.e. Asturias, 'LEMI' i.e. Murcia, 'LERS' i.e. Reus, 'GCLA' i.e. La Palma, 'LECO' i.e. A Coruña, 'LEJR' i.e. Jerez, 'LEVX' i.e. Vigo, 'LEGR' i.e. Granada, 'LEXJ' i.e. Santander, 'LEAM' i.e. Almería, 'LEZG' i.e. Zaragoza, 'LESO' i.e. San Sebastián, 'GEML' i.e. Melilla, 'LEVD' i.e. Valladolid, 'LEPP' i.e. Pamplona, 'GCHI' i.e. El Hierro y 'LEVT' i.e. Vitoria.



*Figura 9.4 Distribución vuelos por tipo de avión y tipo de propulsión para distintos rangos de distancia en España en 2003.*

*Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.*

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

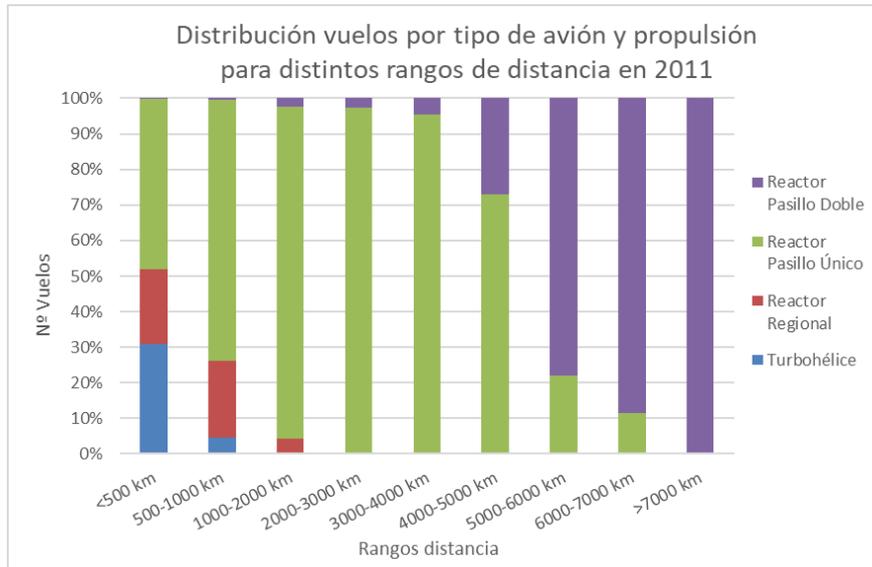


Figura 9.5 Distribución vuelos por tipo de avión y tipo de propulsión para distintos rangos de distancia en España en 2011.

Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

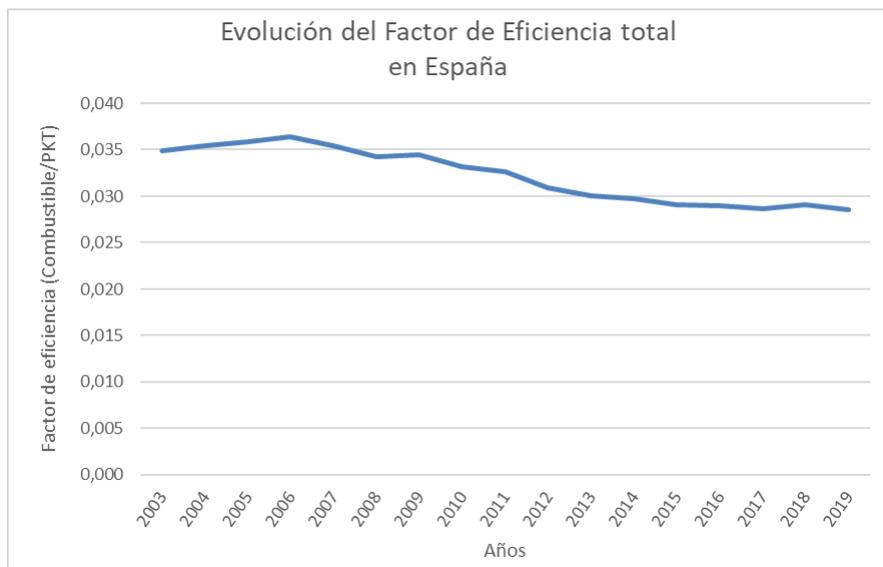


Figura 9.6 Evolución del Factor de Eficiencia total en España.

Elaboración propia con datos de Eurostat y Eurocontrol.

## Impacto de las medidas de política energética y climática sobre la aviación

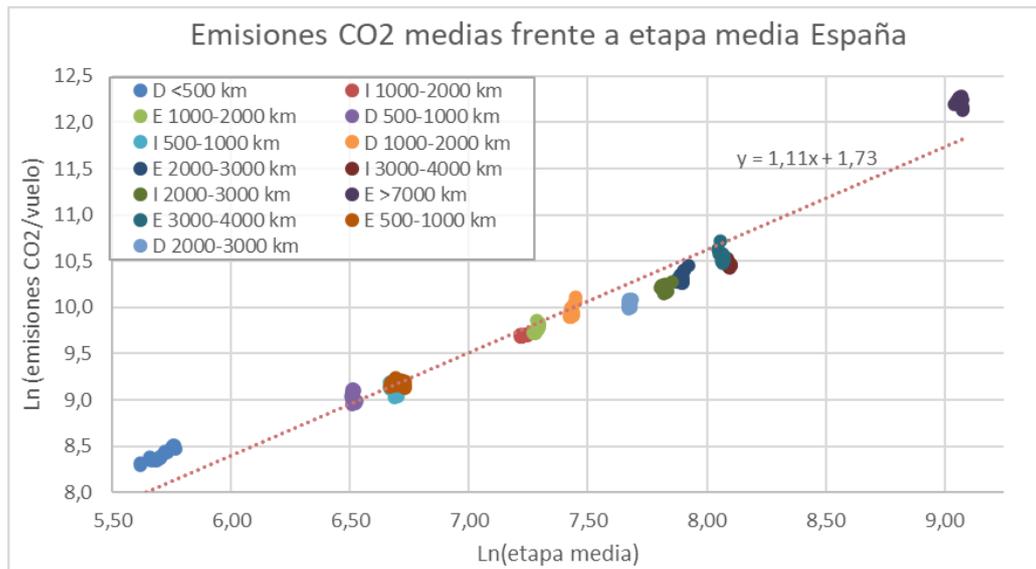


Figura 9.7 Emisiones CO<sub>2</sub> medias frente a etapa media en España de 2003 a 2019 por tipo de vuelo y rango de distancias.

Elaboración propia con datos de Eurostat.

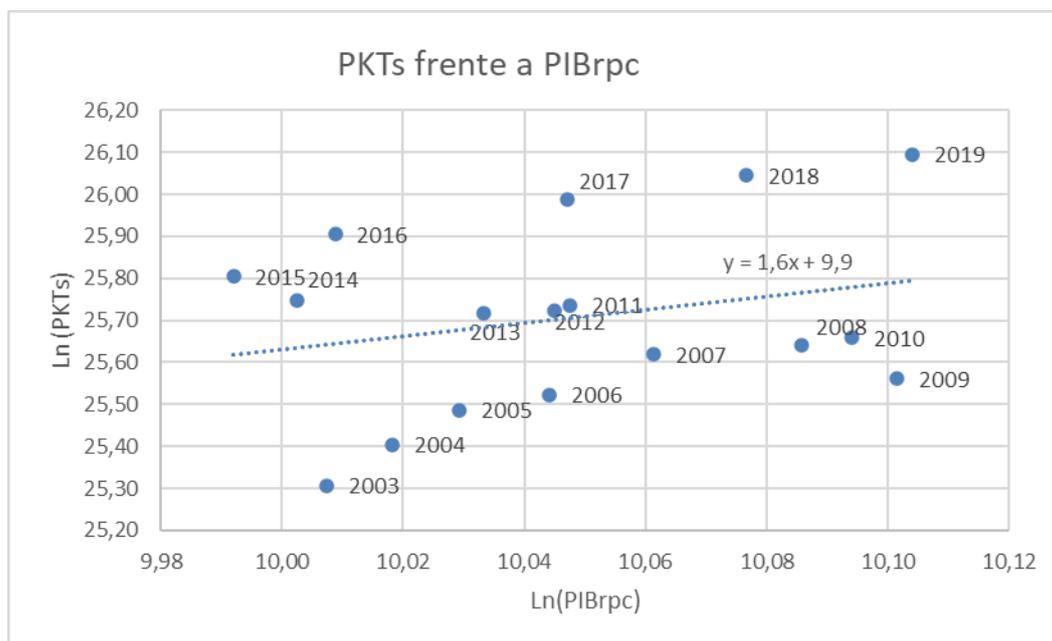


Figura 9.8 PKTs frente a PIB<sub>rpc</sub> en España de 2003 a 2019.

Elaboración propia con datos de Eurostat.

## REFERENCIAS

Aerorreactores (Septiembre, 2019) <b>J. L. Montañés</b> . <i>Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio</i> . .....	46
<b>Agencia Europea del Medio Ambiente</b> . (2016). Master emissions calculator. 1.A.3.a Aviation - Annex 5 .....	26
<b>Alonso, Benito, Lonza y Kousoulidou</b> . (2014). Investigations on the distribution of air transport traffic and CO2 emissions within the European Union. <i>Journal of Air Transport Management</i> .....	13, 23, 25
<b>Banco de España</b> . (2010) La economía española en la crisis mundial.....	20
Comisión Europea (Julio, 2021) .....	11
Decarbonising Aviation: CLEARED FOR TAKE-OFF. Industry Perspectives. (2021) <b>Shell in collaboration with Deloitte</b> .....	17
<b>Eurocontrol</b> .....	24, 36
European Green Deal: new law agreed to cut aviation emissions by promoting sustainable aviation fuels, (2023). <b>European Commission</b> .....	11, 16
<b>Eurostat</b> . (2021) .....	20
<a href="https://www.aena.es/es/pasajeros/nuestros-aeropuertos.html">https://www.aena.es/es/pasajeros/nuestros-aeropuertos.html</a> , <b>AENA</b> .....	37
<a href="https://www.emirates.com/">https://www.emirates.com/</a> .....	48
<a href="https://www.iberia.com/">https://www.iberia.com/</a> .....	47, 48
<a href="https://www.ign.es/">https://www.ign.es/</a> , <b>Instituto Geográfico Nacional</b> .....	12, 19
<a href="https://www.traveler.es/articulos/francia-prohibe-los-vuelos-cortos">https://www.traveler.es/articulos/francia-prohibe-los-vuelos-cortos</a> .....	43
<b>INE</b> . (2018) .....	20
ReFuelEU Aviation - Sustainable Aviation Fuels. Impact Assessment (2020) <b>European Commission</b> .....	17
The Economist (Febrero, 2021).....	11