



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

  
ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial  
y Diseño Industrial

Impacto medioambiental de la propuesta de ley para limitar  
los vuelos cortos con alternativa de tren en España

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Motato García, Juan Camilo

Tutor/a: López Juárez, Marcos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## Resumen

Tras el anuncio del gobierno español sobre la propuesta de ley para limitar los viajes en avión que tuviesen alternativa en tren en menos de 2 horas y media, surge la necesidad de confirmar si esta medida es realmente beneficiosa desde un punto de vista medioambiental. Este estudio realiza un análisis medioambiental a través del análisis del ciclo de vida de las aeronaves que realizan y realizarán (2024, 2030 y 2050) estas posibles rutas. Para ello, primero se ha tenido que discernir cuáles son las rutas aéreas limitadas; segundo, se ha estimado el tráfico de pasajeros que cambiarían su modo de transporte; después se han calculado las emisiones por pasajero que genera cada medio de transporte y así poder compáralos. Por último, en función de los resultados, se proponen nuevas rutas a limitar para seguir ampliando la propuestas de ley o se presentan avances en el sector aéreo para mitigar sus emisiones, en lugar de tener que limitar su operativa.

**Palabras claves:** propuesta de ley, tráfico aéreo, aeronave, pronóstico de pasajeros, análisis de ciclo de vida e impacto medioambiental

## Abstract

Upon the announcement by the Spanish government regarding the proposed legislation aimed at restricting air travel with a corresponding train alternative of less than two and a half hours, the imperative arises to ascertain whether this measure indeed yields environmental benefits. This study undertakes an environmental analysis through the life cycle assessment of the aircraft operating and scheduled to operate (in 2024, 2030, and 2050) these potential routes. To accomplish this, it was first necessary to discern which air routes would be subject to limitations; secondly, an estimation of passenger traffic likely to switch modes of transportation was conducted; thereafter, emissions per passenger for each mode of transportation were calculated to facilitate comparison. Finally, based on the findings, proposals are put forth for additional routes to be subject to restrictions to further bolster the legislative propositions or advancements within the aviation sector aimed at mitigating its emissions are presented, thereby obviating the need for operational limitations.

**Keywords:** legislative proposal, air traffic, aircraft, passenger forecast, life cycle assessment and environmental impact.

## Índice general

Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Contexto medioambiental . . . . .	10
1.2. Situación en España . . . . .	15
1.3. Estado actual del tráfico aéreo en España . . . . .	20
1.4. La propuesta de ley . . . . .	23
1.5. Introducción al análisis de ciclo de vida (LCA) . . . . .	24
1.6. Estudios previos y relevancia del estudio . . . . .	27
1.7. Objetivos del estudio . . . . .	28
1.8. Resumen de la metodología . . . . .	28
1.9. Estructura del estudio . . . . .	29
<b>2. Metodología</b>	<b>30</b>
2.1. Fase 1: tráfico aéreo afectado . . . . .	31
2.1.1. Definición de los horizontes de estudio . . . . .	31
2.1.2. Selección de rutas aéreas afectadas . . . . .	31
2.1.3. Recopilación de datos . . . . .	33
2.1.4. Análisis de variables . . . . .	37
2.1.5. Prognosis de tráfico aéreo . . . . .	41
2.1.6. Demanda esperada . . . . .	43
2.1.7. Selección de las aeronaves de referencia . . . . .	45
2.2. Fase 2: análisis de ciclo de vida . . . . .	46
2.2.1. Definición de escenarios . . . . .	46
2.2.2. Límites y flujos ambientales . . . . .	47
2.2.3. Unidad funcional y categoría de impacto . . . . .	47
2.2.4. Inventario del ciclo de vida (LCI) . . . . .	48
2.2.5. Limitaciones e hipótesis . . . . .	49
2.2.6. Impacto ambiental. A320 - 2024 . . . . .	52
2.2.7. Impacto ambiental. A320 NEO - 2030 . . . . .	54
Índice general	TFM
	4

2.2.8.	Impacto ambiental. A320 NEO - 2050 . . . . .	56
2.2.9.	Impacto ambiental. AVE - 2024 . . . . .	57
2.2.10.	Impacto ambiental. AVE - 2030 . . . . .	58
2.2.11.	Impacto ambiental. AVE - 2050 . . . . .	59
2.2.12.	Impacto ambiental. Turismo . . . . .	59
2.3.	Fase 3: comparativa . . . . .	60
2.4.	Fase 4: propuestas . . . . .	63
<b>3.</b>	<b>Tráfico aéreo afectado</b>	<b>64</b>
3.1.	Rutas aéreas afectadas . . . . .	64
3.2.	Pasajeros afectados . . . . .	64
3.3.	Operaciones afectadas . . . . .	65
3.4.	Aeronaves de referencia . . . . .	66
<b>4.</b>	<b>Análisis del ciclo de vida</b>	<b>68</b>
4.1.	Resultado del LCA de la aeronave . . . . .	68
4.2.	Resultado del LCA del AVE . . . . .	69
4.3.	Resultado del LCA del coche . . . . .	70
<b>5.</b>	<b>Análisis comparativo de las emisiones de GEI</b>	<b>71</b>
<b>6.</b>	<b>Propuestas del estudio</b>	<b>73</b>
6.1.	Aumento del uso del SAF . . . . .	73
6.2.	Desarrollo de la propulsión por hidrógeno . . . . .	74
6.3.	Optimización de rutas - SESAR . . . . .	75
6.4.	Supresión del tankering . . . . .	76
6.5.	Comparativa e implementación de las propuestas . . . . .	77
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>78</b>
7.1.	Conclusiones del TFM . . . . .	78
7.2.	Trabajos futuros . . . . .	80
<b>A.</b>	<b>Número de operaciones y pasajeros</b>	<b>81</b>
<b>B.</b>	<b>Pliego de condiciones</b>	<b>87</b>

<b>C. Presupuesto</b>	<b>91</b>
<b>D. Relación del trabajo con los ODS de la agenda 2030</b>	<b>93</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>

## Índice de figuras

1.	Emisiones de $CO_2$ por sectores en 2019. <i>Fuente: IEA [4]</i> . . . . .	10
2.	Proyecciones del calentamiento global hasta el 2100: emisiones y aumento de temperatura anticipado según compromisos y políticas actuales. <i>Fuente: IPCC [7]</i> . . . . .	12
3.	Evolución de las emisiones de $CO_2$ por modo de transporte en el escenario de desarrollo sostenible, 2000-2030. <i>Fuente: IEA [8]</i> . . . . .	13
4.	Mapa de líneas AVE (morado) y Larga Distancia (gris). <i>Fuente: Renfe [21]</i> . 16	
5.	Mapa de aeropuertos de España en 2024. <i>Fuente: enteraT.com [22]</i> . . . . .	17
6.	Diagrama de flujo de la metodología. . . . .	30
7.	Pasajeros anuales de las 3 rutas. <i>Fuente: Aena [73]</i> . . . . .	34
8.	Operaciones anuales de las 3 rutas. <i>Fuente: Aena [73]</i> . . . . .	34
9.	Operaciones por aeronave de las 3 rutas. <i>Fuente: Aena [73]</i> . . . . .	36
10.	Tráfico aéreo mundial 1970-2021. <i>Fuente: Banco Mundial [74]</i> . . . . .	37
11.	Pasajeros red Aena y tráfico de pasajeros de las rutas seleccionadas 2013-2023. <i>Fuente: Statista [75] y Aena [30]</i> . . . . .	38
12.	PIB anual de España y tráfico de pasajeros de las rutas seleccionadas 2013-2023. <i>Fuente: Statista [75] y Aena [73]</i> . . . . .	39
13.	Habitantes de España y tráfico de pasajeros de las rutas seleccionadas 2013-2022. <i>Fuente: Banco Mundial [76] y Aena [73]</i> . . . . .	40
14.	Prognosis del tráfico aéreo de pasajeros hasta 2050. . . . .	42
15.	Límites del sistema y flujos ambientales. . . . .	47
16.	Mezcla de tecnologías de motor de vehículos consideradas. <i>Fuente: DGT [92], ICIS [93] y BCG [94]</i> . . . . .	50
17.	Proyección del mix energético por fuente de energía para 2024, 2030 y 2050. <i>Fuente: GaBi</i> . . . . .	51
18.	Número de pasajeros anuales de las tres rutas, en los horizontes de estudio. 65	
19.	Número de operaciones anuales de las tres rutas, en los horizontes de estudio. . . . .	65
20.	Airbus A320. <i>Fuente: Airbus [80]</i> . . . . .	66
21.	Airbus A320 NEO. <i>Fuente: Airbus [81]</i> . . . . .	66
22.	Emisiones GEI-100 del ciclo de vida de una aeronave. . . . .	68
23.	Emisiones GEI-100 del ciclo de vida de un AVE. . . . .	69
24.	Emisiones GEI-100 del ciclo de vida de un coche. <i>Fuente: J.M. Desantes, et al. [87]</i> . . . . .	70
25.	Comparativa de las emisiones GEI-100 por pasajero. . . . .	71

## Índice de tablas

1.	Caracterización de las rutas aéreas de menos de 4 horas. <i>Fuente: Ecologistas en Acción [70].</i> . . . . .	32
2.	Caracterización de las rutas aéreas de menos de 2,5 horas. <i>Fuente: Ecologistas en Acción [70] y Renfe [71].</i> . . . . .	33
3.	Aeronaves con más de 500 operaciones en las 3 rutas. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . . .	35
4.	Aeronaves con más de 10.000 operaciones en las 3 rutas. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . . .	36
5.	Prognosis de pasajeros para la ruta MAD-ALC. . . . .	43
6.	Prognosis de pasajeros para la ruta MAD-BCN. . . . .	43
7.	Prognosis de pasajeros para la ruta MAD-VLC. . . . .	43
8.	Prognosis de operaciones para la ruta MAD-ALC. . . . .	44
9.	Prognosis de operaciones para la ruta MAD-BCN. . . . .	44
10.	Prognosis de operaciones para la ruta MAD-VLC. . . . .	44
11.	Incremento en el uso de cada modelo de aeronaves en 2023 con respecto a 2019. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . . .	45
12.	Composición por materiales del A320 <i>Fuente: K. Rendigs and M. Knüwer [83] y A. García [84].</i> . . . . .	48
13.	Composición por materiales del Tren de Alta Velocidad <i>Fuente: Ecoinvent [86] y Renfe [85].</i> . . . . .	48
14.	Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un A320 - 2024. . . . .	52
15.	Consumo de combustible medio de las rutas. . . . .	52
16.	Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de combustible para un A320 - 2024. . . . .	53
17.	Emisiones GEI-100 asociadas a la operación de un A320 - 2024. . . . .	53
18.	Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un A320 NEO - 2030. . . . .	54
19.	Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de combustible para un A320 NEO - 2030. . . . .	55
20.	Emisiones GEI-100 asociadas a la operación de un A320 NEO - 2030. . . . .	55
21.	Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un A320 NEO - 2050. . . . .	56
22.	Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de combustible para un A320 NEO - 2050. . . . .	56
23.	Emisiones GEI-100 asociadas a la operación de un A320 NEO - 2050. . . . .	56
24.	Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un AVE - 2024. . . . .	57

25.	Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de electricidad para un AVE - 2024. . . . .	57
26.	Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un AVE - 2030. . . . .	58
27.	Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de electricidad para un AVE - 2030. . . . .	58
28.	Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un AVE - 2050. . . . .	59
29.	Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de electricidad para un AVE - 2050. . . . .	59
30.	Emisiones del ciclo de vida completo por cada modo de transporte para realizar un trayecto promedio de las 3 rutas. . . . .	61
31.	Pasajeros y operaciones consideradas por cada modo de transporte para la comparativa. . . . .	61
32.	Emisiones del ciclo de vida completo por pasajero asociadas a cada modo de transporte. . . . .	62
33.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2023. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	81
34.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2022. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	81
35.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2021. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	82
36.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2020. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	82
37.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2019. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	83
38.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2018. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	83
39.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2017. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	84
40.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2016. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	84
41.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2015. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	85
42.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2014. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	85
43.	Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2013. <i>Fuente: Aena [73].</i> . . . .	86
44.	Coste asociado a la mano de obra. . . . .	91
45.	Coste asociado al Software necesario. . . . .	92
46.	Coste total asociado a la realización del proyecto. . . . .	92

# 1 Introducción

El objetivo de este apartado es poder darle al lector un contexto completo para poder apreciar mejor este trabajo.

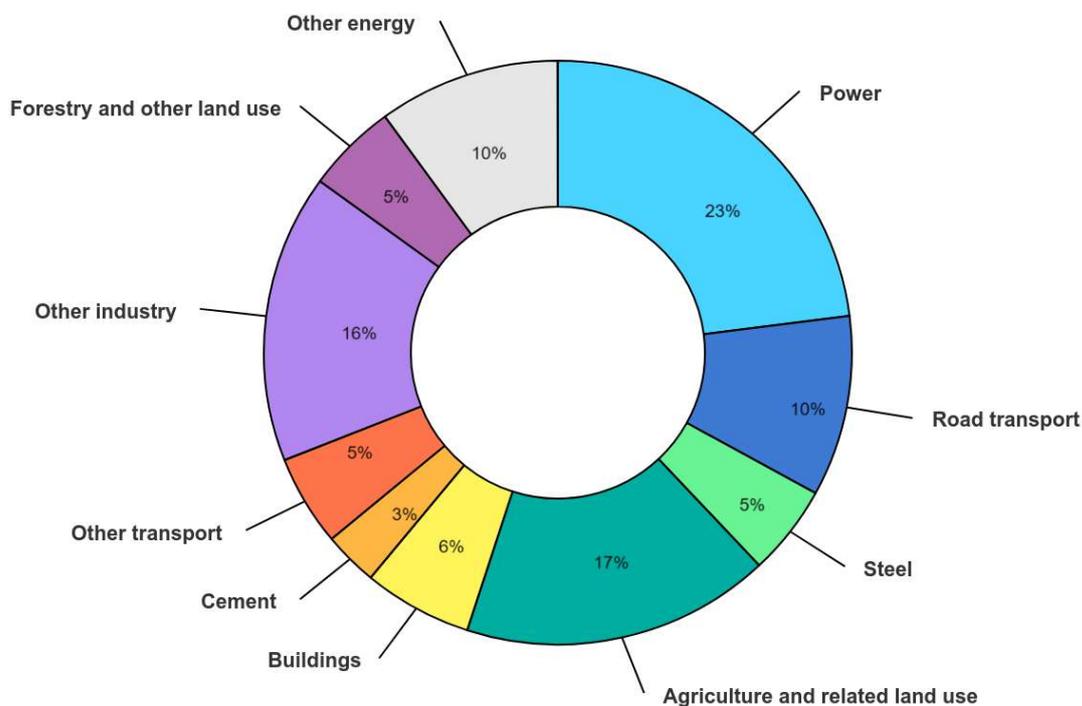
## 1.1 Contexto medioambiental

### Cambio climático

El cambio climático es uno de los desafíos más urgentes y complejos de la actualidad, afectando profundamente a los ecosistemas, la economía y la sociedad. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), es crucial limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales para evitar impactos severos e irreversibles en la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la habitabilidad de muchas regiones del planeta. [1]

Para alcanzar este objetivo, es necesaria una transformación significativa en la producción y consumo de energía, la gestión de recursos naturales y la estructura de las economías. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y las prácticas agrícolas y ganaderas, son un factor clave. El Acuerdo de París de 2015 establece un marco global para la acción climática, instando a los países a limitar el calentamiento global y a aumentar sus compromisos de reducción de emisiones periódicamente. [2]

El sector del transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de GEI, representando aproximadamente el 15 % de las emisiones directas de  $CO_2$  a nivel mundial, con el transporte por carretera aportando alrededor del 10 % de las emisiones totales en 2019, tal y como se puede observar en la figura 1. [3]



**Figura 1:** Emisiones de  $CO_2$  por sectores en 2019. Fuente: IEA [4].

## Compromisos internacionales

Los esfuerzos internacionales para abordar la crisis climática se han materializado en una serie de compromisos que buscan coordinar la acción global. El más significativo de estos es el Acuerdo de París, que representa un hito histórico en la lucha contra el cambio climático. Adoptado por 196 partes en la COP21 en París, en 2015, este acuerdo establece un marco legalmente vinculante para que los países mitiguen sus emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo central del Acuerdo de París es mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2 grados Celsius respecto a los niveles preindustriales y continuar los esfuerzos para limitar el aumento de temperatura incluso más, a 1,5 grados Celsius. Esta meta se basa en la evidencia científica que indica que superar el umbral de 1,5 grados podría tener efectos catastróficos y no reversibles para los sistemas climáticos y la vida en la Tierra.[2]

El Acuerdo de París es único en su enfoque inclusivo y flexible, permitiendo que cada país establezca sus propios objetivos de reducción de emisiones, conocidos como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs). Estas NDCs son planes nacionales que detallan las acciones específicas que cada país tomará para contribuir al esfuerzo global de mitigación y adaptación al cambio climático. Se espera que los países actualicen sus NDCs cada cinco años, aumentando progresivamente su ambición en línea con el objetivo de la descarbonización global a largo plazo. [5]

### La urgencia de actuar

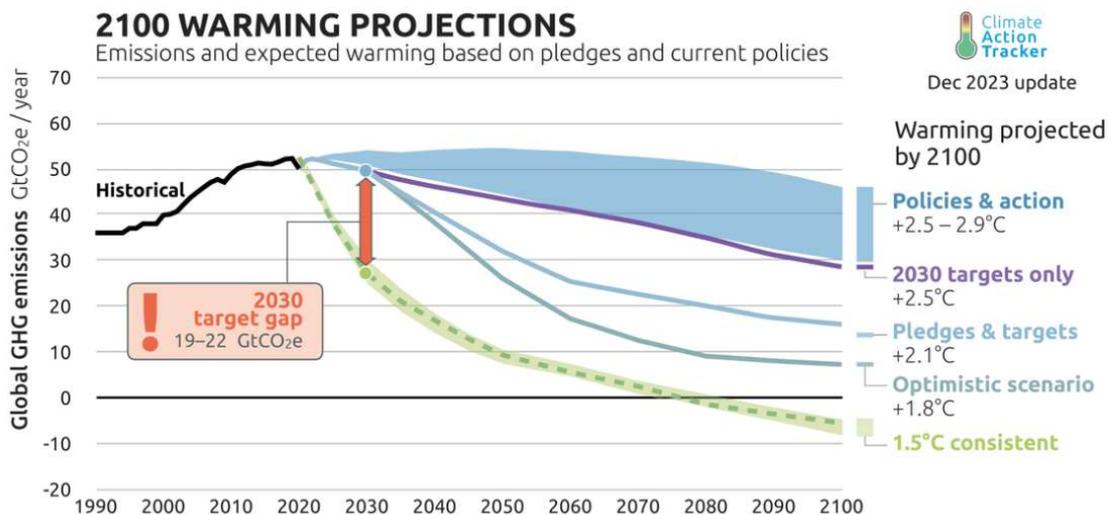
El cambio climático representa una necesidad imperativa respaldada por el consenso científico. Según el IPCC, se requieren cambios rápidos y profundos en todos los aspectos de la sociedad para mantener el aumento de la temperatura global dentro de un umbral seguro de 1,5°C. La ventana para efectuar estas transformaciones se está cerrando rápidamente. [6]

El IPCC indica que las emisiones globales de  $CO_2$  deben reducirse en un 45% para 2030 respecto a los niveles de 2010 y alcanzar cero neto hacia 2050 para mantener el calentamiento en 1,5°C. Esto implica revisar la generación de energía, diseño urbano, producción y consumo de bienes y el uso del transporte. [6]

El sector del transporte, que incrementa rápidamente sus emisiones, necesita una transición acelerada hacia la sostenibilidad. Esto incluye tecnologías más limpias, promoción de movilidad sostenible y rediseño de políticas urbanas para reducir la dependencia del transporte privado. [3]

La ciencia subraya la urgencia de la acción climática, con un movimiento global demandando respuestas y compromisos ambiciosos de líderes políticos y empresariales. La próxima década será crítica para asegurar un planeta habitable y resiliente [7].

La figura 2 de *Climate Action Tracker* muestra la disparidad entre las acciones actuales y los objetivos necesarios para mantener el calentamiento a 1,5°C. Este gráfico revela una brecha significativa entre las metas de reducción de emisiones para 2030 y los niveles proyectados, subrayando la necesidad de intensificar las políticas de mitigación climática [7].

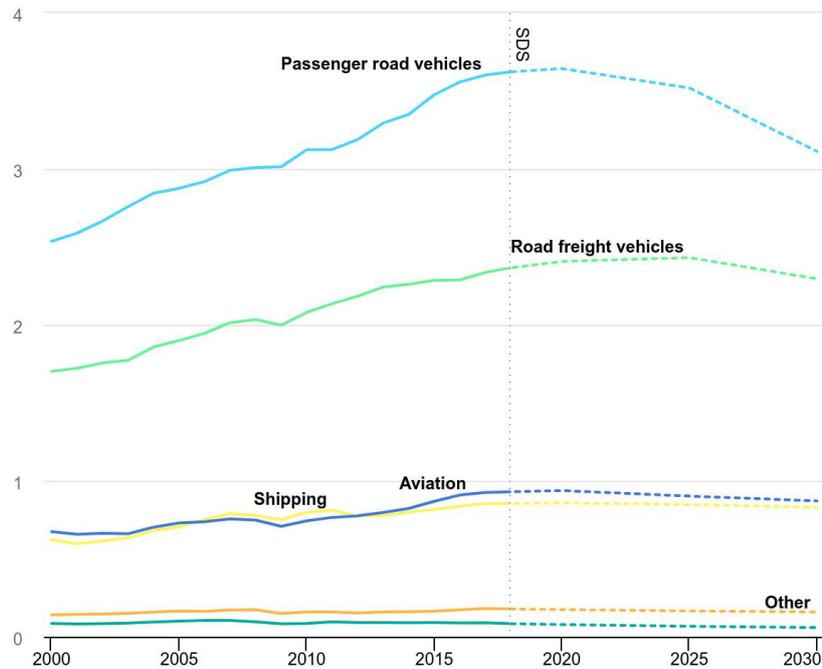


**Figura 2:** Proyecciones del calentamiento global hasta el 2100: emisiones y aumento de temperatura anticipado según compromisos y políticas actuales. Fuente: IPCC [7].

### El sector del transporte como emisor GEI

El sector del transporte desempeña un papel fundamental en la economía global, pero también es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero, representando aproximadamente el 15 % de las emisiones directas a nivel mundial. Esta cifra es aún más significativa si se considera que el transporte es uno de los sectores con el crecimiento más rápido en cuanto a emisiones de GEI, debido a la creciente demanda de movilidad personal y de carga en todo el mundo. La Agencia Internacional de Energía (IEA) indica que las emisiones del transporte podrían aumentar sustancialmente en las próximas décadas si no se implementan políticas efectivas para controlarlas. [8]

La figura 3 ilustra la trayectoria de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector del transporte por modo desde el año 2000 y proyecta tendencias hasta el 2030. Se observa claramente que los vehículos de pasajeros representan la mayor parte de estas emisiones, seguidos por los vehículos de carga por carretera. La aviación y el transporte marítimo también contribuyen de manera significativa, aunque en menor medida. Importante destacar es la inflexión proyectada post-2020, donde las políticas y tecnologías sostenibles comienzan a influir en la reducción de emisiones, en línea con el Escenario de Desarrollo Sostenible (SDS). Este escenario sugiere que, con las políticas adecuadas y el compromiso continuo hacia la sostenibilidad, es posible alcanzar una tendencia decreciente en las emisiones de GEI en el sector del transporte. [8]



**Figura 3:** Evolución de las emisiones de  $CO_2$  por modo de transporte en el escenario de desarrollo sostenible, 2000-2030. Fuente: IEA [8].

El transporte aéreo, en particular, es reconocido como uno de los modos de transporte con mayor intensidad de carbono. Aunque representa una porción más pequeña del total de las emisiones del sector, sus emisiones están aumentando rápidamente y su impacto es significativamente mayor debido a que los efectos de las emisiones a gran altitud son más dañinos para la atmósfera. Además, las opciones para reducir las emisiones en la aviación son más limitadas en comparación con otros modos de transporte, lo que hace que la gestión de su crecimiento y la búsqueda de alternativas sostenibles sean imperativas. [9]

La transición hacia formas de transporte más sostenibles y de baja emisión es, por lo tanto, esencial para cumplir con los objetivos internacionales de reducción de GEI. Esto incluye fomentar el uso del transporte público, el desarrollo de vehículos más eficientes y menos contaminantes, la electrificación de los sistemas de transporte y el desarrollo de combustibles menos contaminantes. [10]

Las políticas para mitigar las emisiones del transporte deben ser integrales y considerar la movilidad urbana, el tráfico interurbano y los viajes internacionales. En el caso del transporte aéreo, medidas como el desarrollo de combustibles sostenibles, mejoras en la eficiencia operativa de las aeronaves y la implementación de esquemas de compensación y reducción de carbono son esenciales para avanzar hacia un sector aéreo más sostenible. [11]

### Transición hacia el transporte sostenible

El transporte sostenible se ha convertido en un pilar fundamental de las estrategias globales para combatir el cambio climático. Este sector, vital para el desarrollo económico y la conectividad, enfrenta el desafío de evolucionar hacia sistemas que minimicen su impacto ambiental. La transición hacia el transporte sostenible implica una serie de cambios estructurales y tecnológicos orientados a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. [3]

En el corazón de esta transición se encuentra la promoción de modos de transporte de baja emisión. El transporte ferroviario, en particular, se destaca como una alternativa viable y más ecológica a los vuelos en rutas cortas. Con un menor impacto por pasajero-kilómetro en comparación con los vehículos personales y la aviación, el ferrocarril ofrece una solución de movilidad eficiente y menos contaminante. Su promoción como alternativa preferente es un ejemplo clave de cómo las políticas de transporte pueden alinearse con los objetivos medioambientales. [3]

Políticas y propuestas de ley en diferentes jurisdicciones buscan incentivar el cambio hacia modos de transporte más sostenibles. Estas medidas pueden incluir la inversión en infraestructura ferroviaria, subvenciones para la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de transporte, impuestos al carbono que reflejen el costo ambiental del transporte aéreo y terrestre y normativas que prioricen el transporte colectivo y no motorizado. [12]

La viabilidad de estas alternativas sostenibles ya se está demostrando en varios países, donde las inversiones en redes ferroviarias de alta velocidad y la mejora en los servicios de trenes convencionales están proporcionando una alternativa competitiva a la aviación de corta distancia. Además, el avance en las tecnologías de electrificación y la utilización de fuentes de energía renovables están allanando el camino para un transporte ferroviario aún más sostenible y con menor emisión de carbono. [13]

La integración de políticas de transporte con la planificación urbana y regional también es fundamental para facilitar la transición hacia el transporte sostenible. El diseño de ciudades compactas y funcionales, junto con la inversión en sistemas de transporte público eficientes y accesibles, puede reducir la dependencia de los vehículos personales y disminuir las emisiones urbanas. [12]

### **Conclusión del contexto medioambiental**

La revisión del cambio climático, los compromisos internacionales, la urgencia de actuar y la relevancia del sector del transporte como emisor de GEI culmina en la necesidad de adoptar medidas concretas y efectivas para la mitigación de los impactos climáticos. La propuesta de ley en España para restringir los vuelos cortos cuando exista alternativa en tren es un reflejo de cómo las políticas nacionales pueden y deben alinearse con los objetivos climáticos internacionales. Este tipo de legislación no solo se enfoca en la disminución de las emisiones de GEI, sino que también forma parte de un debate más amplio sobre la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental que define esta era.

Al analizar la propuesta de ley española en el contexto de este estudio, se destaca el papel de las políticas nacionales en la contribución a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático. La iniciativa española se convierte en un caso de estudio valioso para entender cómo las medidas legislativas pueden facilitar la transición hacia un transporte más sostenible y, al mismo tiempo, cómo pueden ser percibidas y adoptadas por la sociedad.

Es vital que la transición hacia prácticas sostenibles no se limite a una sola industria o sector, sino que sea un cambio integral y transversal que llegue a todos los niveles de la sociedad y la economía. En este sentido, el estudio de la propuesta de ley para limitar los vuelos cortos con alternativa de tren en España es emblemático de los esfuerzos por remodelar el panorama del transporte y, por extensión, de las dinámicas de consumo y producción de energía en pos de un futuro más sostenible.

## 1.2 Situación en España

### Dependencia del transporte aéreo

España, con su geografía diversa que incluye tanto la península como numerosas islas, ha desarrollado una dependencia significativa del transporte aéreo. Esta dependencia se enraíza tanto en la necesidad de mantener la cohesión territorial entre la península y los archipiélagos de las Islas Canarias y Baleares como en el fomento de una industria turística que representa un pilar central de la economía española.

El transporte aéreo no solo facilita la integración nacional entre la península y sus islas, sino que también conecta a España con el resto de Europa y destinos globales, siendo esencial para el desarrollo y mantenimiento del sector turístico. El turismo representaba en 2022 aproximadamente el 12 % del PIB español, se basa en gran medida en la accesibilidad aérea, que permite la llegada de aproximadamente 85 millones de visitantes anuales, ubicando a España como uno de los principales destinos turísticos mundiales. [14, 15]

Sin embargo, esta dependencia del transporte aéreo presenta desafíos significativos desde una perspectiva de sostenibilidad. El sector aéreo es responsable de una fracción considerable de las emisiones de GEI de España y su crecimiento, impulsado por el turismo y la demanda de viajes internos, puede estar en conflicto con los objetivos de reducción de emisiones del país.

Para abordar esta dependencia de una manera que armonice las necesidades económicas y los compromisos medioambientales, España ha comenzado a explorar alternativas. A pesar de la conveniencia y la rapidez del transporte aéreo, existe un potencial significativo para redirigir parte del tráfico aéreo hacia el transporte ferroviario, especialmente en rutas donde la eficiencia del tren de alta velocidad puede competir con los tiempos de viaje aéreos. [16]

### Desarrollo del tren de alta velocidad

España ha realizado una inversión estratégica significativa en su red de Alta Velocidad Española (AVE), posicionándose como una pionera en Europa en términos de kilómetros de vías de alta velocidad per cápita. Esta red conecta las principales ciudades peninsulares con un servicio rápido y eficiente, ofreciendo una alternativa competitiva al transporte aéreo para distancias medias y largas dentro del país. Esta expansión no solo refleja el compromiso de España con la modernización de su infraestructura de transporte, sino que también forma parte de una estrategia más amplia para fomentar la sostenibilidad y reducir las emisiones de GEI asociadas al transporte. [17]

El desarrollo del AVE se enmarca dentro del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) de España, que ha establecido objetivos ambiciosos para ampliar la red de alta velocidad y mejorar la interconectividad a lo largo del país. El PEIT ha sido fundamental para orientar las inversiones en infraestructuras de transporte y ha buscado equilibrar la necesidad de movilidad con la urgencia de cumplir con los compromisos medioambientales nacionales e internacionales. [18]

El tren de alta velocidad no solo ha mejorado la movilidad interna y la cohesión territorial entre las diversas regiones de España, sino que también ha contribuido a un modelo de transporte más sostenible. Comparado con los vuelos domésticos, el AVE ofrece una significativa reducción en las emisiones de carbono por pasajero-kilómetro, apoyando los esfuerzos de España para reducir su huella de carbono en el sector del transporte, que es vital para alcanzar los objetivos establecidos en el Acuerdo de París. [19, 20]



de España. Los diferentes iconos representan aeropuertos públicos y privados, gestionados por diversas entidades.

En conjunto, estos mapas son herramientas valiosas para discutir cómo las infraestructuras de transporte coexisten y compiten en España, ofreciendo una visión de la capacidad actual y potencial de la red ferroviaria para complementar y, en algunos casos, reemplazar la demanda de movilidad que actualmente se satisface con el transporte aéreo.



Figura 5: Mapa de aeropuertos de España en 2024. Fuente: *enteraT.com* [22].

Esta imagen ilustra visualmente la extensión y la accesibilidad del transporte aéreo en España, un país que depende significativamente del turismo y del tráfico aéreo para la integración de sus regiones más remotas y sus dos archipiélagos, las Islas Canarias y Baleares. El aeropuerto de Madrid-Barajas, como nodo central, facilita una gran parte de los vuelos nacionales e internacionales, subrayando su rol como un hub crucial en la red de transporte español y europeo.

Al comparar esta imagen con la red de trenes de alta velocidad, se puede analizar cómo el transporte aéreo complementa al ferroviario en términos de alcance geográfico y opciones de viaje, especialmente para destinos que no son fácilmente accesibles por ferrocarril, como las islas. Sin embargo, también plantea preguntas sobre la sostenibilidad ya que los aeropuertos son puntos de alta emisión de GEI debido al uso intensivo de combustibles fósiles en la aviación.

Esta infraestructura aérea, aunque esencial para el actual modelo socio-económico de España, presenta desafíos en la transición hacia una economía baja en carbono. Las dos imágenes pueden servir de base para discutir cómo las políticas nacionales buscan equilibrar la necesidad de conectividad con las metas de reducción de emisiones y cómo incentivar el uso de alternativas de transporte menos contaminantes, como el tren de alta velocidad, puede ser una estrategia viable en ciertas rutas.

## Políticas de transporte y energía

España, como miembro de la Unión Europea, está comprometida con una serie de políticas energéticas y de transporte que buscan alinearse con los ambiciosos objetivos de reducción de emisiones establecidos en el Acuerdo de París y los propios objetivos climáticos de la UE. Estas políticas son fundamentales para dirigir el país hacia una transición energética y asegurar una movilidad sostenible que contribuya a un futuro de bajas emisiones de carbono.

- Marco de política energética y de transporte. En el ámbito energético, España ha adoptado el “Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030” (PNIEC), que establece una hoja de ruta para la transición hacia una economía más verde. Este plan detalla medidas específicas, incluyendo el aumento de la generación de energía renovable, la mejora de la eficiencia energética y la electrificación del transporte. La transición hacia fuentes de energía renovables es especialmente relevante para el sector del transporte, que es uno de los mayores consumidores de energía y emisores de GEI en el país. [23]
- Estrategias de movilidad sostenible. España también ha elaborado estrategias de movilidad sostenible que incluyen la promoción del transporte público y modos de transporte no motorizados, el fomento del uso de vehículos eléctricos y la inversión en infraestructuras de transporte sostenible como parte del “Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia” post-Covid-19. Estas estrategias buscan no solo reducir las emisiones sino también mejorar la calidad del aire y la calidad de vida de los ciudadanos. [24]
- Legislación y regulaciones. A nivel legislativo, se ha aprobado una ley de cambio climático y transición energética, que establece el marco para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo un modelo energético sostenible y competitivo. Se fijan objetivos de descarbonización, incluyendo la reducción de emisiones de GEI en un 55 % para 2030 en comparación con 1990 y alcanzar la neutralidad climática para 2050. También incluye disposiciones para la mejora de la eficiencia energética, el desarrollo de energías renovables y la implementación de políticas para una transición justa. [25]
- Incentivos y subvenciones. Además, el gobierno español ha implementado incentivos y subvenciones para promover la adquisición de vehículos eléctricos y la instalación de infraestructuras de recarga. Estas medidas buscan acelerar la transición hacia una flota de transporte menos contaminante y más eficiente en el uso de la energía. [24]
- Compromisos internacionales. En el contexto internacional, España respalda iniciativas como el “Pacto Verde Europeo” (European Green Deal), que busca hacer de Europa el primer continente climáticamente neutro para 2050. Las políticas de transporte y energía de España están diseñadas para contribuir a este esfuerzo colectivo, buscando un equilibrio entre la competitividad económica y la protección ambiental. [26]

## Retos y oportunidades

El proceso de transición de España del transporte aéreo al ferroviario enfrenta múltiples retos. Uno de los principales es la necesidad de inversiones económicas sustanciales para mejorar y expandir la infraestructura ferroviaria existente, asegurando que pueda gestionar un aumento en la demanda y proporcionar un servicio que sea competitivo con el aéreo en términos de tiempo y conveniencia. Además, existe el desafío de la aceptación social ya que cambiar los patrones de movilidad arraigados en la población puede requerir esfuerzos significativos en educación y marketing.

España, en su esfuerzo por desplazar parte del tráfico aéreo hacia el ferroviario, encara el reto de continuar el desarrollo y la adopción de aeronaves más eficientes y menos contaminantes. La inversión en I+D para la innovación en la aviación es crucial, enfocándose en aeronaves que utilicen combustibles alternativos, como el hidrógeno o la electricidad y en la mejora de la eficiencia aerodinámica y de los motores.

Este camino presenta oportunidades para posicionar a España a la vanguardia de la tecnología aeroespacial verde, abriendo puertas al desarrollo económico a través de la creación de empleos de alta cualificación y el fortalecimiento de la industria aeroespacial. Asimismo, contribuye al cumplimiento de los objetivos medioambientales del país y al liderazgo en la mitigación del cambio climático a nivel global.

## Iniciativas actuales

España ha emprendido iniciativas significativas y propuestas legislativas que buscan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en línea con los objetivos tanto nacionales como internacionales. Una de las iniciativas más notables es la propuesta de ley que contempla limitar los vuelos cortos siempre que exista una alternativa viable de tren, especialmente aquellos recorridos que pueden completarse en tren en menos de dos horas y media. Esta medida legislativa está diseñada para reducir la huella de carbono asociada con el transporte aéreo y potenciar el uso de trenes de alta velocidad, que tienen una menor emisión de GEI por pasajero. [27]

Esta iniciativa se espera que tenga un impacto significativo en la movilidad sostenible y en el comportamiento de viaje, promoviendo un cambio modal del aire al ferrocarril. Además, se alinea con los compromisos adquiridos por España bajo el Acuerdo de París y con el objetivo de la Unión Europea de reducir las emisiones de GEI en al menos un 55 % para 2030 en comparación con los niveles de 1990. [2, 28]

## Impacto del Covid-19

La pandemia de Covid-19 ha provocado cambios sin precedentes en el sector del transporte en España, obligando a una reevaluación de las prácticas de movilidad. La reducción drástica en la demanda de viajes, tanto aéreos como terrestres, durante los confinamientos, ha planteado desafíos económicos significativos para el sector. Sin embargo, también ha ofrecido una visión de cómo podrían ser los patrones de movilidad baja en carbono, con un aire más limpio y calles menos congestionadas.

De esta crisis se pueden extraer lecciones valiosas para el transporte sostenible. La rápida adaptación a modelos de teletrabajo y la disminución de viajes no esenciales han demostrado la posibilidad de reducir la demanda de transporte mientras se mantiene la actividad económica. Este fenómeno ofrece un campo de estudio para entender cómo la digitalización y la flexibilidad laboral pueden contribuir a un sistema de transporte más sostenible en el futuro. [29]

### 1.3 Estado actual del tráfico aéreo en España

#### Volumen del tráfico aéreo actual

En el pasado año 2023, el tráfico de viajeros en los aeropuertos gestionados por Aena aumentó de forma considerable, registrando un incremento medio de toda la red del 2,9 % con respecto al año 2019 (año récord hasta entonces) y del 16,2 % con respecto al año 2022 (año con todavía cierta influencia del Covid-19). En total, pasaron por los aeropuertos de la red Aena en España más de 283 millones de pasajeros, de los cuales más de 93 millones de pasajeros fueron en vuelos nacionales, es decir, casi un tercio de los pasajeros que cogieron un vuelo despegaron de un aeropuerto español y aterrizaron en otro aeropuerto de la red (se incluyen aquí también los pasajeros con vuelos de conexión cuya escala es un aeropuerto español). [30]

En términos de operaciones, en 2023 se tuvieron más de 2,4 millones de operaciones en los aeropuertos españoles (un 8,5 % mayor que 2022 y un 1,8 % mayor que 2019), de los cuales más de 1,1 fueron vuelos nacionales (algo más de un 45 %), esta diferencia con respecto al número de pasajeros se explica en que las aeronaves regionales tienen menor capacidad que las aeronaves de rango medio e internacionales. [30]

Estos datos reflejan una recuperación notable del sector aéreo español y apuntan hacia una tendencia positiva en el volumen de tráfico aéreo. Se espera que el año 2024 sea aún mejor que el 2023, pudiéndose comprobar que los pasajeros en los aeropuertos españoles durante enero de 2024 fueron un 10,3 % mayores a los del mismo mes de 2023. Igualmente, las operaciones en el mes de enero de 2024 aumentaron un 6 % mayor con respecto al mismo mes de 2023. Para una exploración más detallada de las estadísticas y tendencias actuales, los informes anuales proporcionados por el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible y Aena ofrecen una amplia gama de datos. [30, 31]

#### Infraestructura aeroportuaria

La infraestructura aeroportuaria de España se caracteriza por su extensa y moderna red, administrada principalmente por Aena, la entidad pública que gestiona 46 aeropuertos y 2 helipuertos en el país. Estos aeropuertos son cruciales para las conexiones nacionales e internacionales, facilitando el acceso a una amplia gama de destinos globales. Aena licitó el año pasado el servicio de seguridad en su red, con un enfoque en la modernización tecnológica para mejorar los procedimientos de seguridad y agilizar el tránsito de pasajeros. Este proceso incluye la implementación de nuevos equipos de detección de explosivos y tecnologías avanzadas para el control de equipajes y la identificación de pasajeros. [32]

Siguiendo la mentalidad de modernización, a principios de 2024 se renovaron las licencias para el servicio de asistencia en tierra a las compañías aéreas, destacando que implicarán mejoras muy significativas en calidad y sostenibilidad: el 80 % de la flota de los operadores de handling será eléctrica en 2024 y el 88 % en 2030. Además, en 2024 la flota sostenible alcanzará el 99,23 % y en 2030 llegará al 100 %. Un claro ejemplo de cómo el sector aéreo se preocupa también por el medioambiente. [33]

En términos de infraestructura aeroportuaria, España alberga 50 aeropuertos con conexiones internacionales directas, destacando los aeropuertos de Madrid y Barcelona como dos de los más importantes de Europa. En 2018 los aeropuertos españoles conectaban directamente con cuatro continentes, 74 países y 189 ciudades a través de 672 rutas aéreas, lo que subraya la capacidad de España de servir como un centro neurálgico de conexiones aéreas a nivel mundial. [34]

## Tendencias operacionales

Para hacer un análisis introductorio de las tendencias operacionales de las aerolíneas basadas en España, se presentan a continuación las nuevas rutas en 2024 por cada compañía aérea:

- Air Europa.
  - Rutas a Túnez, Santorini, Atenas y Alghero. [35]
- Air Nostrum.
  - Ruta Vigo - Bilbao. [36]
  - Desde Córdoba a Las Palmas y a Mallorca. [37]
  - Ruta Mallorca - Andorra. [38]
  - Ruta Sevilla - Madeira. [39]
- Iberia. [40]
  - Vuelos a Boston, Chicago y Los Ángeles (EE.UU.).
  - Vuelos a Iationamérica: Maldivas (Argentina), Guayaquil (Ecuador), Cali (Colombia) y San Juan (Puerto Rico).
  - Vuelos a Dubrovnik, Split, Zadar y Zagreb (Croacia).
  - Vuelos a Bari, Cagliari, Catania, Olbia y Palermo (Italia).
- Ryanair.
  - Desde Tenerife Sur a Budapest, Cardiff, Marrakech, Memmingen, Knock, Weeze, Pisa y Toulouse. [41]
  - Desde Tenerife Norte a Budapest, Cardiff, Düsseldorf Weeze, Knock, Marrakech, Memmingen, Pisa y Toulouse. [41]
  - Desde Sevilla a Trieste, Birmingham y Budapest. [39]
  - Ruta Alicante-Elche - Barcelona. [42]
  - Ruta Castellón - Milán. [42]
  - Ruta Girona - Bari. [42]
  - Desde Valencia a Ancona, Verona, Breslavia, Varsovia, Birmingham y Sofía. [43]
- Volotea.
  - Desde Málaga y Bilbao a Bari. [44]

Se puede ver que la mayoría de las aerolíneas basadas en España apuestan por conexiones directas con ciudades europeas; Iberia apuesta por vuelos internacionales con América, los cuales deberán ser alimentados como *Hub* correspondiente; Air Nostrum, filial regional, apuesta por vuelos domésticos. Centrando el análisis en las nuevas rutas domésticas,

se observa que se trata de rutas en las que no existe alternativa de alta velocidad en tren (Vigo-Bilbao y Alicante-Barcelona), aunque por distancia, podrían algún día estar conectadas por AVE en menos de 2 horas y media. Se trataría de una inversión relativamente bastante costosa.

### Iniciativas de sostenibilidad

En España, las aerolíneas y los aeropuertos están implementando medidas para fomentar la sostenibilidad y reducir las emisiones de  $CO_2$ , alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Iberia ha iniciado diversas iniciativas operacionales y ha renovado su flota, logrando una reducción de emisiones de  $CO_2$  de un 35-37%. Además, Iberia se ha comprometido a utilizar un 10% de combustibles de aviación sostenibles (SAF) en todos sus vuelos para 2030, con una inversión de 900 millones de euros. [45]

Aena, el mayor gestor aeroportuario del mundo, está implementando su Plan de Acción Climática para alcanzar la neutralidad de carbono en 2026 y Net Zero Carbono para 2040. Este plan incluye inversiones de cerca de 550 millones de euros entre 2021 y 2030, enfocándose en la reducción de emisiones propias y de las aerolíneas mediante el uso de flotas eléctricas para operaciones en tierra y la instalación de hidrogeneras. [45]

Ryanair también ha invertido 22.000 millones de dólares en la renovación de su flota para 2050, con la compra de 210 aviones “gamechangers” de Boeing, de los cuales ya ha recibido 80, prometiendo reducir significativamente las emisiones de  $CO_2$ . [45]

Estas iniciativas reflejan un esfuerzo amplio para abordar el impacto ambiental del transporte aéreo, incluyendo la adopción de vehículos eléctricos en aeropuertos, reducción de plásticos, reciclaje de residuos a bordo, digitalización de procesos y uso de energías renovables en las instalaciones de Iberia [46]. Estas acciones demuestran un compromiso significativo con la sostenibilidad y los pasos que el sector aéreo en España está tomando para reducir su huella ambiental.

### Comparativa con el tráfico ferroviario

La liberalización del sector ferroviario en España ha introducido nuevos operadores en el mercado, ofreciendo más opciones a los pasajeros y potencialmente bajando los precios en algunas rutas. Sin embargo, incluso con estos cambios, el transporte aéreo mantiene varias ventajas en términos de velocidad y eficiencia en rutas largas o sin conexión directa de alta velocidad. Además, proyectos como la remodelación de la estación madrileña de Chamartín y la estación barcelonesa de La Sagrera, junto con las inversiones realizadas por Renfe y nuevos operadores como Ouigo e Iryo, reflejan un compromiso con la mejora y expansión del sistema ferroviario, aunque estos esfuerzos aún enfrentan desafíos para alcanzar la eficiencia y cobertura del transporte aéreo. [47, 48]

El transporte aéreo en España continúa creciendo, con los aeropuertos españoles experimentando aumentos significativos en el tráfico. Este crecimiento es un testimonio de la demanda continua de viajes aéreos, impulsada por la conveniencia, la rapidez y la amplia red de destinos disponibles, factores que son particularmente relevantes para rutas que carecen de una alternativa eficiente de alta velocidad.

La comparación entre ambos modos de transporte no solo se limita a la eficiencia operativa y la cobertura de la red, sino también a las inversiones realizadas para mejorar la experiencia del pasajero y adaptarse a un mercado liberalizado. El sector ferroviario está trabajando para aumentar su competitividad, pero aún tiene que abordar ciertos desafíos estructurales y de costes para competir efectivamente con el transporte aéreo en todas las rutas. [47]

## Políticas gubernamentales

Recientemente, España ha destacado por sus esfuerzos en promover la sostenibilidad en el sector aéreo mediante la creación de la Alianza para la Sostenibilidad del Transporte Aéreo (AST). Esta alianza multisectorial incluye más de 900 empresas, entidades académicas y ONGs, y tiene como objetivo liderar la descarbonización del sector aéreo, promoviendo el desarrollo de tecnologías innovadoras y combustibles sostenibles. La AST también busca fomentar la colaboración público-privada en I+D+i para aviones de bajas emisiones [49, 50]. Además, se han establecido acuerdos bilaterales con países como México, Italia y Estados Unidos para promover el uso y producción de combustibles sostenibles para la aviación, demostrando un compromiso claro con la mitigación del cambio climático y la preservación de la calidad del aire. [51]

## Desarrollo tecnológico

España está realizando avances significativos en el sector aeronáutico con un enfoque en el desarrollo de aeronaves más eficientes y menos contaminantes. El Programa Tecnológico Aeronáutico, lanzado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, ha destinado 160 millones de euros para apoyar la innovación y el desarrollo tecnológico en este ámbito, con la expectativa de movilizar más de 300 millones de euros en fondos públicos y privados. Los principales objetivos incluyen mejorar la eficiencia medioambiental, reducir las emisiones y aumentar la eficiencia energética, así como avanzar en la digitalización aeronáutica mediante el uso de materiales avanzados como el plástico reforzado con fibra de carbono para crear aviones más ligeros y eficientes. La participación de la industria española en proyectos internacionales, como la contribución de Aernnova a la estructura de alas laminar para Airbus, subraya el papel de España en la vanguardia del desarrollo tecnológico aeronáutico. [52, 53]

### 1.4 La propuesta de ley

La propuesta de ley en España que **busca limitar los vuelos cortos cuando exista una alternativa de tren de menos de 2 horas y media (“se señala como excepción a las conexiones con aeropuertos-hub que enlacen con rutas internacionales”)**, forma parte de un esfuerzo más amplio por promover una movilidad más sostenible y reducir las emisiones de  $CO_2$ . Este movimiento se alinea con políticas medioambientales tanto nacionales como de la Unión Europea, con el objetivo de impulsar el transporte ferroviario como una opción más verde frente a los vuelos domésticos en rutas específicas. Aunque la medida ha sido propuesta como parte del acuerdo de legislatura entre el PSOE y Sumar, su implementación práctica podría ser limitada, ya que afectaría principalmente a cinco rutas principales que conectan Madrid con otras ciudades españolas, como Barcelona, Valencia, Alicante, Málaga y Sevilla. Estas rutas son consideradas por su capacidad de ser recorridas en tren en menos tiempo y ya cuentan con una infraestructura ferroviaria competitiva. La iniciativa se inspira en acciones similares adoptadas en Francia y busca ser un paso hacia la reducción del impacto ambiental del sector del transporte, pese a la oposición del sector aéreo que argumenta que la medida tendría un impacto limitado en la reducción de emisiones globales. [54-57]

Este enfoque hacia una movilidad más sostenible se complementa con otras medidas contempladas por el Gobierno, como la introducción de impuestos relacionados con la movilidad que generan emisiones, en un intento de ajustar la fiscalidad del transporte a la realidad del uso de vehículos y su impacto ambiental. Asimismo, se prevé una transformación urbana que promueva menos vehículos privados y más transporte público, bicicletas y vehículos compartidos, junto con la promoción del automóvil eléctrico como una solución cada vez más viable y económica para la movilidad futura. [58]

## 1.5 Introducción al análisis de ciclo de vida (LCA)

### Definición e Importancia del LCA

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés Life Cycle Assessment) es una metodología exhaustiva utilizada para evaluar los impactos ambientales de todas las etapas de la vida de un producto, proceso o servicio, desde la adquisición de materias primas hasta su disposición final y reciclaje. Respaldada por las normas ISO 14040 y 14044, permite identificar, cuantificar y evaluar emisiones, consumo de agua, generación de residuos y otros impactos ambientales. [59-63]

Según la norma ISO 14040:2006, el LCA evalúa las cargas ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto a lo largo de su ciclo de vida, adoptando una perspectiva “de la cuna a la tumba” [59, 60]. Este enfoque es crucial para identificar oportunidades de mejora ambiental, facilitar la toma de decisiones en políticas gubernamentales y estrategias corporativas, y desarrollar normativas. También ayuda a los stakeholders a comprender las implicaciones ambientales de sus decisiones de producción y consumo. [64, 65]

La metodología del LCA se divide en cuatro fases principales: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario de ciclo de vida (LCI), evaluación del impacto de ciclo de vida (LCIA) e interpretación. Esta estructura garantiza un análisis detallado y sistemático de los impactos ambientales, proporcionando una base sólida para decisiones sostenibles. [66]

Además, el LCA fomenta la transparencia y la comunicación efectiva sobre el desempeño ambiental entre fabricantes, proveedores, clientes y otros stakeholders, apoyando el desarrollo de etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales de producto, mejorando la confianza del consumidor. Las agencias gubernamentales y organismos internacionales también utilizan el LCA para evaluar el impacto ambiental de políticas y programas, contribuyendo a la formulación de legislaciones que promuevan la eficiencia de recursos y la protección del medioambiente. [67]

### Objetivo del LCA

- **Identificación de oportunidades de mejora.** A través de la evaluación de las fases de vida de productos o servicios, el LCA permite identificar etapas críticas donde las intervenciones pueden reducir significativamente los impactos ambientales. [64]
- **Soporte para la toma de decisiones.** El LCA proporciona información crucial que ayuda a fabricantes, diseñadores y responsables políticos a tomar decisiones más informadas respecto a la selección de materiales, procesos de manufactura y estrategias de optimización del ciclo de vida. [67]
- **Desarrollo de políticas ambientales.** Los resultados del LCA pueden informar el desarrollo y la implementación de políticas públicas y estrategias corporativas que busquen la sostenibilidad ambiental, promoviendo prácticas de producción y consumo más sostenible. [65]
- **Comunicación ambiental.** El LCA facilita la comunicación transparente y basada en evidencia sobre el desempeño ambiental de productos y servicios, apoyando el marketing ecológico y las declaraciones ambientales de producto. [66]
- **Benchmarking y mejora continua.** Permite comparar el desempeño ambiental de productos o servicios similares, estableciendo benchmarks para la mejora continua hacia la sostenibilidad. [59, 60]

## Estructura LCA

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) se estructura en cuatro fases fundamentales, tal como lo establecen las normas ISO 14040:2006 y ISO 14044:2006. Esta estructura metodológica permite llevar a cabo evaluaciones sistemáticas y completas de los impactos ambientales asociados a productos, procesos o servicios a lo largo de su ciclo de vida.

### 1. Definición del objetivo y alcance.

Esta fase inicial establece el marco general del estudio, incluyendo la definición clara del objetivo del LCA, el alcance del estudio, la identificación de la unidad funcional y los límites del sistema. Esta etapa es crítica para garantizar la relevancia y coherencia del análisis. [59, 60]

### 2. Análisis del inventario del ciclo de vida (LCI).

El LCI (del inglés, Life Cycle Inventory) implica la recopilación y cuantificación de datos de entrada y salida para cada proceso dentro del sistema estudiado. Esto incluye el uso de recursos naturales, emisiones al aire, agua y suelo y otros intercambios ambientales. El LCI proporciona la base de datos para la posterior evaluación de impacto. [68]

### 3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA).

La LCIA (del inglés, Life Cycle Impact Assessment) traduce las entradas y salidas del inventario en potenciales impactos ambientales. Esto se logra mediante la asignación de inventarios a categorías de impacto específicas y la evaluación de la magnitud de estos impactos utilizando diferentes métodos de evaluación. [69]

### 4. Interpretación.

La última fase implica analizar y evaluar los resultados del LCI y la LCIA para formular conclusiones claras y recomendaciones. La interpretación debe considerar el objetivo y alcance definidos, identificar las limitaciones del estudio y proponer áreas para mejora o investigación adicional. [61-63]

## Tipos de LCA

Dependiendo del objetivo y alcance del estudio, el LCA puede clasificarse en varios tipos, cada uno adaptado a necesidades específicas de análisis y toma de decisiones. Los tipos principales de LCA son:

- **Cradle-to-grave.** Este enfoque ofrece una evaluación completa, desde la extracción de materias primas (cuna) hasta la disposición final del producto (tumba). Es ideal para entender el impacto ambiental total de un producto a lo largo de su ciclo de vida completo. [64]
- **Cradle-to-gate.** Se enfoca en la evaluación de impactos desde la extracción de materias primas hasta el punto en que el producto sale de la “puerta” de la fábrica, excluyendo las fases de uso y disposición final. Este tipo es comúnmente utilizado por los fabricantes para evaluar y mejorar la sostenibilidad de sus procesos de producción. [65]
- **Gate-to-Gate.** Este enfoque es más limitado y se centra únicamente en un proceso o serie de procesos dentro de una organización. Es útil para análisis internos, optimización de procesos y benchmarking entre diferentes operaciones. [61-63]
- **Well-to-Wheel.** Específicamente utilizado en la industria del transporte, este tipo de LCA analiza los impactos ambientales desde la extracción de combustible (pozo)

hasta el movimiento del vehículo (rueda), abarcando tanto la producción y distribución del combustible como su uso final en el vehículo. Es particularmente relevante para la evaluación de alternativas de combustibles y tecnologías de vehículos desde una perspectiva de emisiones de gases de efecto invernadero y eficiencia energética. [67]

Cada tipo de LCA tiene sus aplicaciones específicas y puede proporcionar información valiosa para la toma de decisiones en diferentes etapas de la cadena de valor de un producto o servicio. La elección del tipo de LCA adecuado depende del alcance del estudio, los objetivos específicos de la evaluación y la disponibilidad de datos.

## Desafíos y limitaciones del LCA

### *Desafíos del LCA*

- **Complejidad en la recopilación de datos.** Uno de los principales desafíos es la obtención de datos precisos y representativos para cada etapa del ciclo de vida del producto. La falta de datos específicos puede llevar a la necesidad de hacer suposiciones o utilizar datos genéricos, lo que puede afectar la precisión de los resultados. [67]
- **Variabilidad y calidad de los datos.** La calidad y consistencia de los datos disponibles varían significativamente, lo que puede introducir incertidumbres en el análisis. Esto es especialmente relevante en comparaciones de LCA, donde la coherencia en los métodos de recopilación y análisis de datos es crucial. [64]
- **Alcance del estudio.** Definir el alcance apropiado para un LCA puede ser complicado, especialmente al decidir qué procesos incluir o excluir del análisis. Esto puede llevar a variaciones significativas en los resultados entre estudios similares, dependiendo de las decisiones tomadas respecto al alcance. [65]
- **Selección de categorías de impacto.** La elección de qué impactos ambientales evaluar es otra área de desafío. Diferentes estudios pueden enfocarse en distintos impactos, como el cambio climático, la toxicidad humana, el uso de agua, etc., lo que puede complicar las comparaciones entre LCA. [66]

### *Limitaciones del LCA*

- **Enfoque cuantitativo predominante.** Mientras que el LCA es eficaz para cuantificar los impactos ambientales, puede no capturar adecuadamente aspectos cualitativos importantes, como los impactos sociales o económicos, a menos que se integre en un enfoque más amplio de sostenibilidad. [61-63]
- **Interpretación de resultados.** La complejidad y la naturaleza a menudo contraintuitiva de los resultados del LCA pueden dificultar su interpretación y la comunicación efectiva a los tomadores de decisiones no técnicos. [67]
- **Decisiones basadas en compromisos.** El LCA puede identificar compensaciones entre diferentes impactos ambientales, por ejemplo, reducir el cambio climático a costa de aumentar la eutrofización. Estas compensaciones requieren juicios de valor y decisiones sobre qué impactos priorizar. [64]

## 1.6 Estudios previos y relevancia del estudio

La relevancia de investigar el impacto medioambiental de limitar vuelos cortos con alternativas ferroviarias radica en el intenso debate público sobre la eficacia de estas medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, además, los estudios disponibles no realizan una evaluación medioambiental exhaustiva, se limitan a extrapolar emisiones a partir de datos existentes o a realizar estimaciones de forma superficial. En este estudio se pretende hacer un análisis medioambiental profundo, cuantitativo y dirigido al contexto que atañe. El valor principal de este trabajo radica en la implementación del análisis de ciclo de vida (LCA) detallado para los medios de transporte que pueden realizar las rutas limitadas, proporcionando así una evaluación ambiental realista y completa.

Dejando de lado las aportaciones políticas, se pueden presentar dos estudios contrapuestos. Por un lado, el estudio de Ecologistas en Acción [70] apoya la eliminación de vuelos cortos en España, analizando el impacto medioambiental y la viabilidad de sustituir vuelos domésticos con alternativas ferroviarias de hasta 4 horas. Identifica 11 rutas aéreas potencialmente sustituibles y destaca que el ahorro neto de emisiones sería significativo, reduciendo entre un 30 % y un 40 % las emisiones de los vuelos domésticos peninsulares. Además, examina el impacto en la estructura de mercado y la competencia, concluyendo que la eliminación de estas rutas no afectaría negativamente los niveles de competencia debido a la predominancia de IAG y la presencia mínima de Ryanair en las rutas consideradas. Sin embargo, este estudio aplica una combinación de revisiones literarias y análisis de datos existentes. Además, su análisis de ciclo de vida (LCA) se limita a un enfoque "well to wake".

Por otro lado, en contra de la prohibición de vuelos cortos, el Colegio Oficial de Ingenieros Aeronáuticos de España (COIAE) [56] argumenta que tales medidas tendrían un impacto marginal en la reducción de emisiones de  $CO_2$ . Destacan que los vuelos de menos de 500 km en España representan solo el 12 % de las emisiones totales del sector aéreo en el país y que la aviación doméstica completa contribuye solo con un 1,2 % de las emisiones totales de  $CO_2$ . Además, subrayan que las emisiones asociadas a la construcción de infraestructuras ferroviarias de alta velocidad son significativas y que tardarían décadas en compensarse mediante la reducción de emisiones operacionales. El COIAE propone alternativas más eficientes para reducir las emisiones de la aviación, como la implementación de combustibles sostenibles, la propulsión eléctrica y la mejora de la eficiencia operativa. También enfatizan la importancia de una interconexión eficiente entre la aviación y otros modos de transporte, como el tren, para optimizar el sistema de transporte en su conjunto. Sin embargo, el estudio del COIAE no realiza cálculos propios de emisiones, sino que se basa en resultados de estudios de terceros.

Por lo tanto, la necesidad de este estudio radica en aportar datos cuantitativos que puedan resolver el debate sobre la eficacia de esta propuesta de ley desde un punto de vista medioambiental.

## 1.7 Objetivos del estudio

El estudio aborda un objetivo principal: evaluar la efectividad de la propuesta de ley en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la limitación de vuelos cortos. Para ello, se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- **Calcular el tráfico aéreo afectado.** Evaluar las rutas que se verían limitadas por la ley propuesta, estimar el número de pasajeros y operaciones en distintos horizontes temporales y definir las aeronaves representativas para el análisis de ciclo de vida (LCA).
- **Realizar el análisis del ciclo de vida (cradle-to-grave).** Realizar un análisis exhaustivo del ciclo de vida del transporte aéreo, ferroviario y por carretera, para calcular sus emisiones totales y evaluar su impacto ambiental.
- **Comparar el impacto ambiental.** Calcular las emisiones por pasajero de la situación actual (sin propuesta de ley) y de una situación hipotética (con la propuesta de ley en vigor), para determinar si la propuesta de ley es beneficiosa en términos de reducción de gases de efecto invernadero.
- **Proponer alternativas.** En función de los resultados anteriores, proponer nuevas rutas para limitar (si la propuesta de ley es beneficiosa) o alternativas para reducir las emisiones dentro del sector aéreo (si la propuesta de ley no es beneficiosa).

Este estudio tiene el potencial de influir en las políticas públicas, proporcionando una base de datos cuantitativos basada en el análisis de ciclo de vida de distintos modos de transporte. Esto podría respaldar o refutar la eficacia de la propuesta de ley y sugerir alternativas más eficientes para la reducción de emisiones.

## 1.8 Resumen de la metodología

Este estudio realiza un análisis ambiental a través del análisis del ciclo de vida de los modos de transporte que operarán las posibles rutas afectadas, en los años 2024, 2030 y 2050. La metodología se divide en cuatro fases clave:

### Fase 1: tráfico aéreo afectado.

- Se seleccionan las rutas aéreas que podrían estar sujetas a las limitaciones propuestas por la ley.
- Se recopilan datos de tráfico de pasajeros para estas rutas, para estimar cuántos pasajeros y operaciones se verían afectadas. Además de los modelos de aeronaves.

### Fase 2: análisis de ciclo de vida.

- Se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero totales para cada modo de transporte gracias a aplicar un LCA completo.

### Fase 3: comparativa.

- Con los resultados de las dos fases previas, se calculan las emisiones por pasajero de cada modo de transporte.
- Se comparan las emisiones emitidas de operar estas rutas en dos contextos diferentes: situación actual y situación con la propuesta de ley en vigor.

#### Fase 4: propuestas.

- En función de si la propuesta de ley es beneficiosa o no, se presentan alternativas para seguir reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

#### 1.9 Estructura del estudio

La estructura del TFM se diseña meticulosamente para proporcionar un análisis exhaustivo de la propuesta de ley que busca limitar vuelos cortos en España. La organización de los capítulos será la siguiente:

- **Introducción.** Se establece el marco del estudio, su relevancia, el contexto medioambiental, y se esbozan las preguntas de investigación. La introducción ayudará al lector a contextualizar correctamente el estudio.
- **Metodología.** Se detallan las técnicas y procesos analíticos de las cuatro fases de la metodología explicada en el subapartado anterior.
- **Tráfico aéreo afectado.** Se presentarán los resultados de la fase 1 del estudio, es decir, las rutas aéreas afectadas, los pasajeros, operaciones y modelo de aeronaves.
- **Análisis ciclo de vida.** Se presentarán los resultados de la fase 2, es decir, las emisiones de gases de efecto invernadero de cada modo de transporte.
- **Análisis comparativo.** Se presentará el objetivo principal de este estudio, la comparativa entre realizar las rutas limitadas en avión o el efecto de la entrada en vigor de la propuesta de ley, resaltando si la propuesta de ley es beneficiosa o no.
- **Propuestas.** Se explorarán estrategias innovadoras para la reducción de emisiones en la aviación.
- **Conclusiones y trabajos futuros.** Se sintetizarán los hallazgos principales para responder a los objetivos del estudio y se presentarán líneas de investigación para ampliar el estudio.
- **Anexos.** Se adjuntará toda aquella información relevante y complementaria del estudio.
- **Bibliografía.** Se citarán todas las fuentes utilizadas a lo largo del estudio para respaldar la investigación.

Cada sección se construirá sobre la anterior, asegurando un desarrollo lógico y cohesivo de la investigación.

## 2 Metodología

Para realizar el análisis medioambiental de limitar vuelos cortos con alternativas en tren en menos de 2 horas y media, se procede a realizar la prognosís de tráfico aéreo de las rutas afectadas, posteriormente se realizará el análisis de ciclo de vida de las aeronaves, del tren de alta velocidad y del vehículo por carretera, después se compararán sus emisiones para determinar si la propuesta de ley es beneficiosa o no y en función de esto, se propondrá alternativas para seguir mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta metodología se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 6.

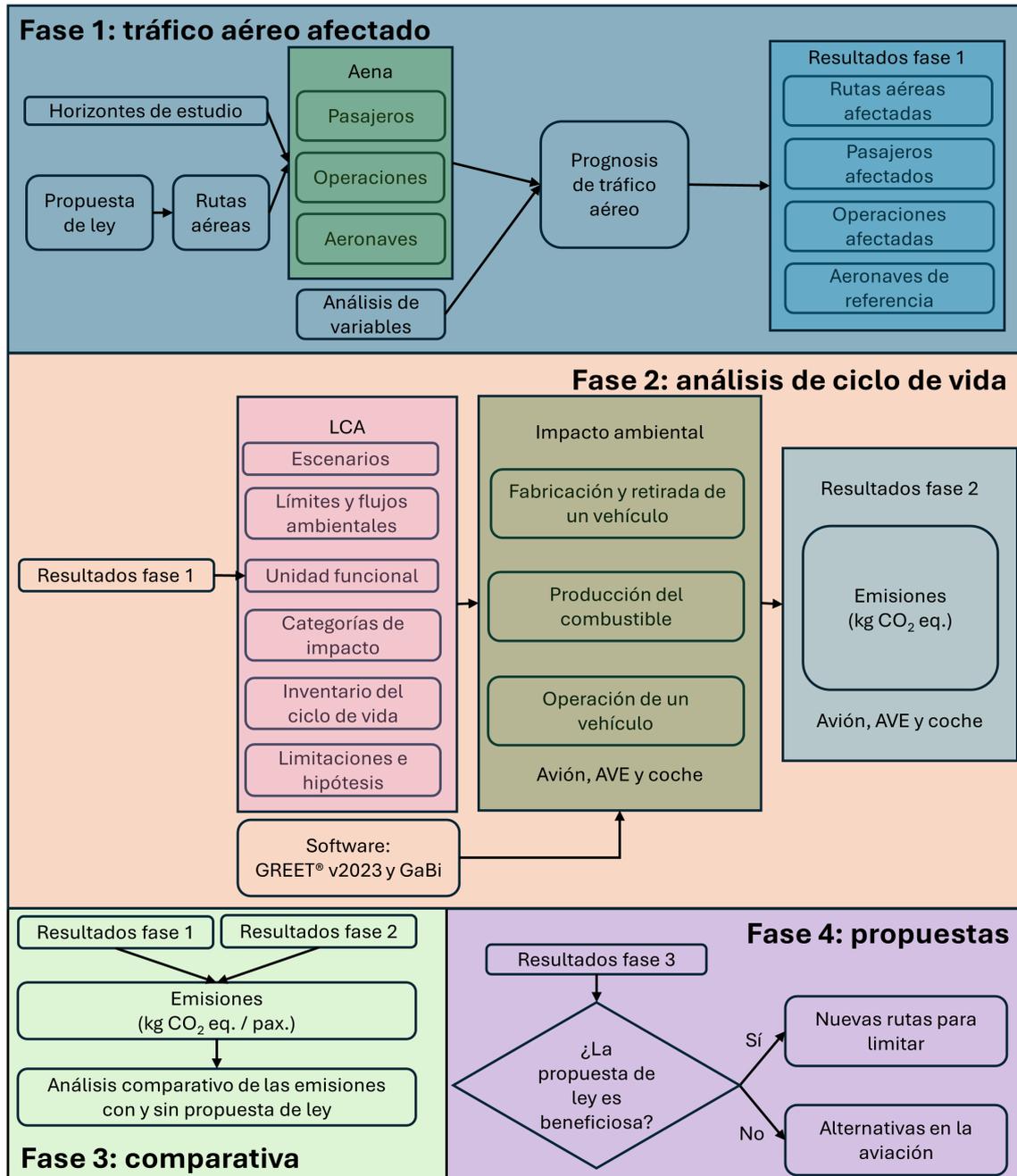


Figura 6: Diagrama de flujo de la metodología.

## 2.1 Fase 1: tráfico aéreo afectado

En esta fase se pretende obtener la siguiente información:

- **Rutas aéreas afectadas.** Se trata de discernir dentro de las rutas aéreas nacionales, aquellas que se verían afectadas por la propuesta de ley. Esto es básico para poder empezar a limitar y definir el estudio, las rutas aéreas seleccionadas serán aquellas que tengan alternativa en tren capaz de realizarse en menos de 2 horas y media.
- **Pasajeros afectados.** Se obtendrá el número de pasajeros anuales en tres horizontes de tiempo que utilizarían las rutas afectadas. Los pasajeros se utilizarán como unidad de medida para poder comparar las emisiones entre los modos de transporte.
- **Operaciones afectadas.** Igualmente, se obtendrá el número de operaciones aéreas. Las operaciones también serán importantes a la hora de poder comparar los distintos modos de transporte.
- **Aeronaves de referencia.** Por último, se definirán las aeronaves de referencia para el análisis en los horizontes de estudio. Puesto que el LCA se realizará sobre los modelos de aeronave que se consideren relevante.

### 2.1.1 Definición de los horizontes de estudio

Es importante definir horizontes de estudio, ya que el tráfico aéreo variará en el tiempo, además, el análisis de ciclo de vida tendrá diferentes consideraciones en función del momento del tiempo en el que se evalúe. Por ello, se definen tres horizontes de estudio para este análisis medioambiental:

- 2024. A corto plazo, año actual y año en el que se podría llevar a cabo el inicio de la propuesta de ley.
- 2030. A medio plazo, año para el que se han presentando diversos objetivos en materia de reducción de emisiones en el sector aéreo, los cuales implicarían grandes beneficios para el medioambiente. [6]
- 2050. A largo plazo, año marcado para alcanzar las cero emisiones netas. [6]

### 2.1.2 Selección de rutas aéreas afectadas

Las rutas aéreas afectadas se mantendrán en el futuro, ya que el objetivo de este estudio es hacer un análisis medioambiental profundo, mientras que, definir rutas diferentes en el tiempo supondría un estudio operacional de las aerolíneas, lo cual no es objeto de este trabajo.

El primer paso para empezar este subapartado es establecer aquellas rutas aéreas que pueden verse limitadas por la propuesta de ley, para ello, se aprovechará el estudio de *Ecologistas en Acción* [70], en el que se presenta la siguiente tabla:

Ruta	Operaciones anuales	Pasajeros anuales	Frecuencias diarias (en cada sentido)	Número de operadores	Distancia de ruta (km)	Tiempo de alternativa ferroviaria (horas: minutos) <sup>3</sup>
<b>Con restricción de frecuencias de la alternativa ferroviaria (al menos 4 frecuencias diarias en cada sentido)</b>						
Alicante-Madrid / Madrid-Alicante	4.055	299.327	5	3	357	2:20
Barcelona-Madrid/ Madrid-Barcelona	15.773	2.569.734	16	3	484	2:29
Barcelona-Valencia/ Valencia-Barcelona	1.164	84.358	1	2	296	2:47
Madrid-Málaga / Málaga-Madrid	4.196	356.665	8	3	432	2:55
Madrid-Pamplona / Pamplona - Madrid	2.500	176.891	3	2	299	3:10
Madrid – Santiago de C. / Santiago de C. – Madrid	4.557	719.617	4	3	484	3:00
Madrid – Sevilla / Sevilla – Madrid	5.108	485.077	3	2	396	2:55
Madrid – Valencia / Valencia - Madrid	4.963	336.320	5	3	286	1:49
<b>Sin restricción de frecuencias de la alternativa ferroviaria</b>						
La Coruña – Madrid / Madrid – La Coruña	5.638	679.715	8	3	506	3:30
Granada – Madrid / Madrid Granada	2.575	198.680	3	2	367	3:42
Logroño – Madrid / Madrid – Logroño	439	12.686	1	1	242	3:29
<b>Total</b>	<b>50.968</b>	<b>5.919.070</b>	-	-	-	

**Tabla 1:** Caracterización de las rutas aéreas de menos de 4 horas. *Fuente: Ecologistas en Acción [70].*

En la tabla 1 se recogen aquellas rutas en tren que pueden realizarse en menos de 4 horas, pero considerando la hipótesis de que las rutas limitadas serán aquellas que puedan realizarse en menos de 2,5 horas [57], se filtra la información para generarse la siguiente tabla:

Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas:minutos)
Alicante-Madrid / Madrid-Alicante	357	2:20
Barcelona-Madrid / Madrid-Barcelona	484	2:29
Valencia-Madrid / Madrid-Valencia	286	1:49

**Tabla 2:** Caracterización de las rutas aéreas de menos de 2,5 horas. *Fuente: Ecologistas en Acción [70] y Renfe [71].*

En la tabla 2 se presentan aquellas rutas aéreas que tienen alternativa en tren capaz de realizarla en menos de 2 horas y media. Tal y como se ha indicado, se han sacado los datos a partir del estudio de Ecologistas en Acción [70], igualmente, se confirma en el artículo de El Debate [72] que solo existen 3 rutas que cumplan esta condición de tiempo, ya que, aunque el artículo presenta 4 rutas, las mismas ya presentadas más la ruta Madrid-Málaga, se confirma en la web de Renfe [71] que la ruta Madrid-Málaga se realiza, como poco, en 2 horas y 44 minutos, quedando fuera de los límites de la propuesta de ley.

### 2.1.3 Recopilación de datos

Los datos de partida para realizar la prognosis y poder estimar el número de pasajeros y operaciones que se verían desplazados de las 3 rutas señaladas, se sacarán de la web de Aena. [73]

Tras realizar cierto filtrado para obtener los datos relevantes para el estudio: número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas definidas anteriormente, en el anexo A se recoge la información sacada de la web de Aena [73] y utilizada como fuente de datos en la realización de tablas y figuras de este apartado.

#### Pasajeros

Se presenta en la figura 7 el número de pasajeros por año de las tres rutas definidas para el periodo 2013-2023. Se puede observar que la ruta Madrid-Barcelona tiene mayor tráfico que las otras dos, alcanzando un máximo en 2019 con más de 2 millones y medio de pasajeros en dicho año y algo menos de 2 millones de pasajeros anuales en 2023. Por su parte, las otras dos rutas tienen un volumen de tráfico similar entre ellas, algo superior la ruta Madrid-Valencia, con el máximo ya en 2023 y en torno a los 350 mil pasajeros anuales.

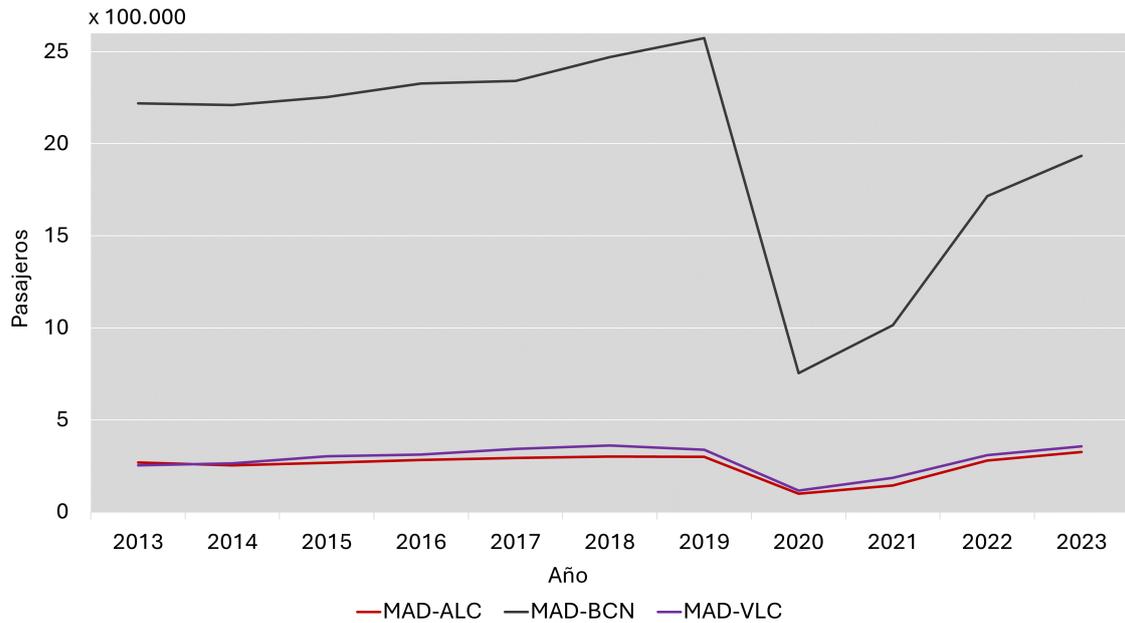


Figura 7: Pasajeros anuales de las 3 rutas. Fuente: Aena [73].

## Operaciones

Igualmente, se muestra en la figura 8 las operaciones anuales, para el mismo periodo, de las tres rutas. Igual que antes, la ruta Madrid-Barcelona está por encima de las otras dos, con un máximo en 2013 de casi 20 mil operaciones anuales, antes del COVID-19 la tendencia era positiva con más de 17 mil operaciones en 2019, las cuales todas no se han alcanzado en 2023: 13 mil operaciones anuales. Las rutas de la Comunidad Valenciana alcanzaron su máximo en 2018, con más de 6 mil quinientas operaciones la ruta con Valencia y casi 4 mil quinientas la ruta con Alicante, en ningún caso se han recuperado estos valores en 2023, situándose en torno a las 4 mil operaciones anuales para ambas rutas.

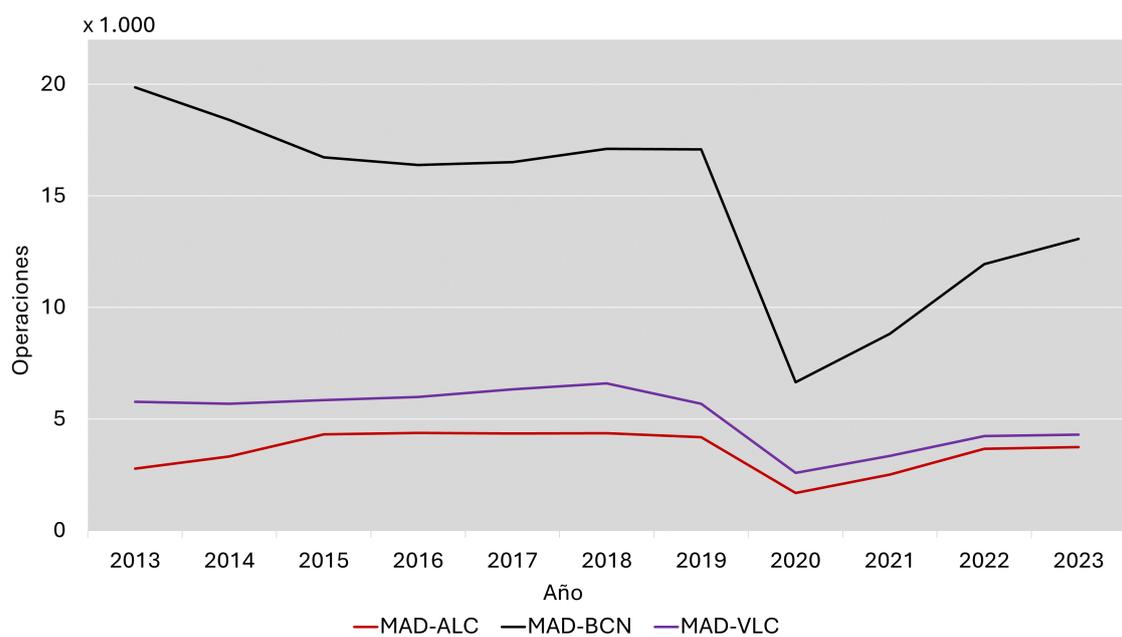


Figura 8: Operaciones anuales de las 3 rutas. Fuente: Aena [73].

Comparándose en conjunto los datos de pasajeros y operaciones, se observa como la ocupación media está en aumento, puesto que aunque levemente, el número de pasajeros está en aumento, el número de operaciones está en claro descenso.

### Aeronaves

Considerando el periodo 2016-2023, han realizado estas rutas más de 150 modelos de aeronaves distintas. Se recogen en la tabla 3 aquellas aeronaves que han realizado más de 500 operaciones en estas rutas.

Modelo	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016
A319	749	399	224	250	423	528	136	261
A320	5.231	4.640	2.429	2.095	7.462	8.739	6.693	7.214
A320 NEO	2.774	1.347	1.597	1.494	2.040	0	0	0
A321	1.556	2.788	1.920	1.075	3.775	4.451	6.401	5.763
A321 (SHARKLETS)	114	19	42	60	19	53	70	229
A330-200	15	19	12	321	1.254	1.317	1.256	1.530
ATR 42-300/320	0	0	0	0	173	70	54	314
ATR-42-300/400	0	0	0	0	129	337	237	28
ATR-42-500	0	0	0	0	0	0	209	529
ATR-72	521	395	289	881	3.082	3.610	3.231	2.258
B737-800 (WINGLETS)	2.766	1.382	414	393	651	624	275	245
B787-8	517	574	683	214	159	151	212	5
B787-9	865	826	347	53	13	51	0	0
CESSNA 500 / 501 / 525	157	130	162	49	60	84	43	36
CESSNA 510 MUSTANG	103	93	178	138	123	96	36	44
CESSNA CITATION	8	6	21	130	257	364	395	343
CRJ 200	95	119	103	66	185	336	358	313
CRJ 900	0	0	0	2	36	771	948	1.840
CRJ-1000	4.445	4.311	3.762	2.493	5.681	5.373	5.093	3.852
DF 2000EX/EASY/LX	232	305	269	92	115	78	100	110
EMB-120 BRASILIA	9	27	30	8	19	27	92	393
ERJ-195, LEGANCY 1000	1	1.472	1.311	293	97	116	86	100
G-200 (GALAXY)	80	111	165	153	157	159	166	195

**Tabla 3:** Aeronaves con más de 500 operaciones en las 3 rutas. *Fuente: Aena [73].*

De estas aeronaves presentadas, se filtra para destacar aquellas con mayor presencia en los últimos años, se reduce a aquellas aeronaves con más de 10.000 operaciones en el periodo 2016-2023, añadiendo además el A320 NEO, que aunque no superaría este corte, es la aeronave con mayor aumento, en los últimos años, ya que este modelo se empezó a utilizar en España, en estas rutas, en el año 2019. Por lo tanto, para el estudio, se podrán considerar las siguientes aeronaves:

Modelo	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016
A320	5.231	4.640	2.429	2.095	7.462	8.739	6.693	7.214
A320 NEO	2.774	1.347	1.597	1.494	2.040	0	0	0
A321	1.556	2.788	1.920	1.075	3.775	4.451	6.401	5.763
ATR-72	521	395	289	881	3.082	3.610	3.231	2.258
CRJ-1000	4.445	4.311	3.762	2.493	5.681	5.373	5.093	3.852

Tabla 4: Aeronaves con más de 10.000 operaciones en las 3 rutas. Fuente: Aena [73].

Como era de esperar, se trata de aeronaves de fuselaje estrecho y de corto/medio alcance. Son aeronaves usadas por aerolíneas regionales y de bajo coste, con configuración de pasajeros similares y optimizadas para rutas regionales. Se destaca que de estos 5 modelos de aeronaves, 3 son del mismo fabricante, Airbus. Se observa que la tendencia del ATR-72 es negativa, lo cual puede deberse a ser el único turbohélice. Por último, se tiene una aeronave fabricada en América del Norte (CRJ-1000), aunque no fabricada por Boeing, principal rival de Airbus.

Para poder observar mejor la tendencia de cada aeronave, se presenta la figura 9. Se destaca que el A320 NEO es la única aeronave que ha realizado más operaciones en 2023 que en 2019 y que el A320 es la aeronave con mayor número de operaciones en la mayoría del periodo.

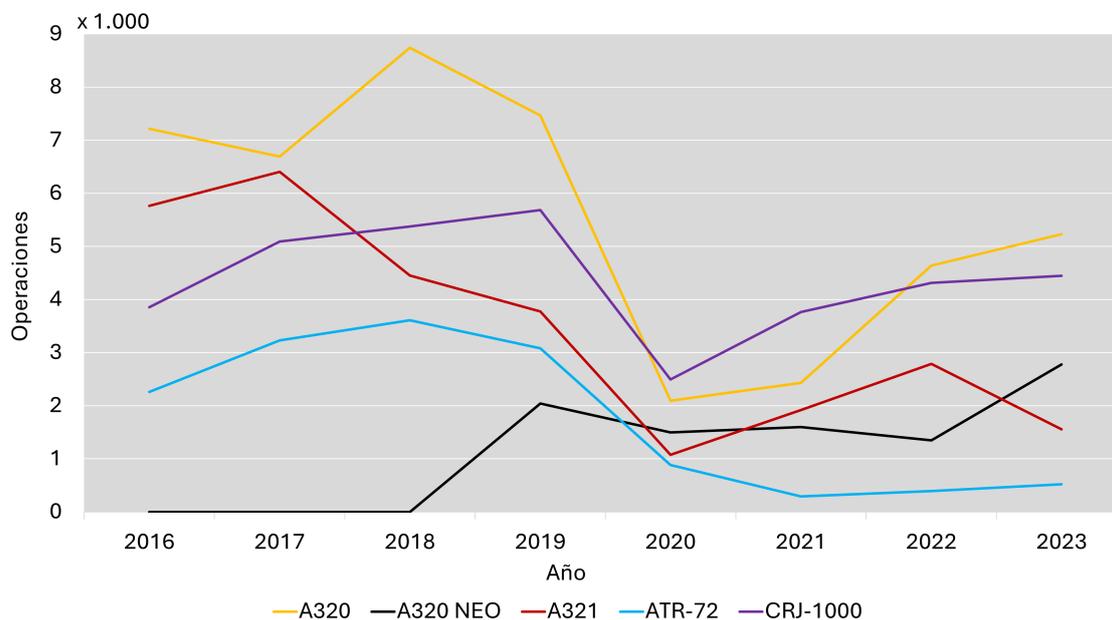


Figura 9: Operaciones por aeronave de las 3 rutas. Fuente: Aena [73].

### 2.1.4 Análisis de variables

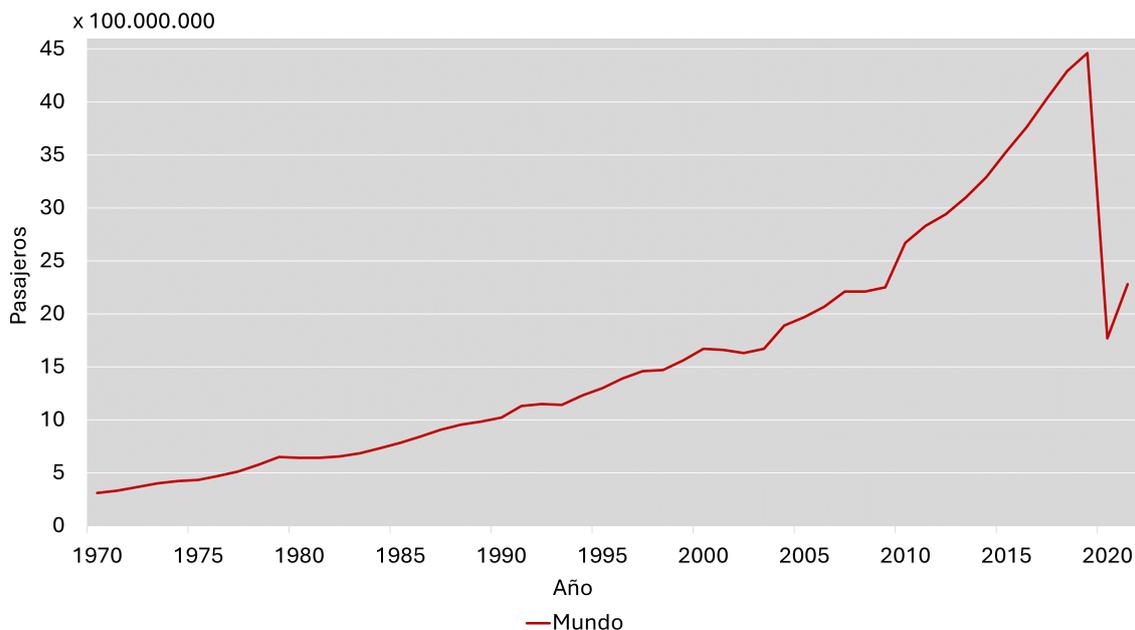
Para poder realizar la prognosis de tráfico aéreo se analizarán ciertas variables que pueden tener relación con el tráfico de las 3 rutas seleccionadas, de esta forma, se podrán sacar relaciones para estimar el tráfico aéreo en los horizontes de estudio.

Se analizarán los siguientes datos:

- Tráfico aéreo mundial.
- Tráfico aéreo nacional.
- PIB nacional.
- Número de habitantes.

#### Tráfico aéreo mundial

La figura 10 muestra la evolución del tráfico aéreo mundial desde 1970 hasta el año 2021.



**Figura 10:** Tráfico aéreo mundial 1970-2021. Fuente: Banco Mundial [74].

Se puede observar un crecimiento sostenido desde 1970 hasta principios del 2000, con un leve descenso en los años 2001 y 2002, debido a los efectos del ataque terrorista del 11 de septiembre de 2001 y la consiguiente crisis en el sector aéreo. Sin embargo, se observa como a partir de 2003 se recupera la tendencia creciente, lo que sugiere una recuperación fuerte y relativamente rápida del sector aéreo.

El siguiente descenso notable ocurre a partir del 2008, que coincide con la crisis financiera global. Esta crisis también ha afectado al tráfico aéreo, pero una vez más, se observa una pronta y rápida recuperación.

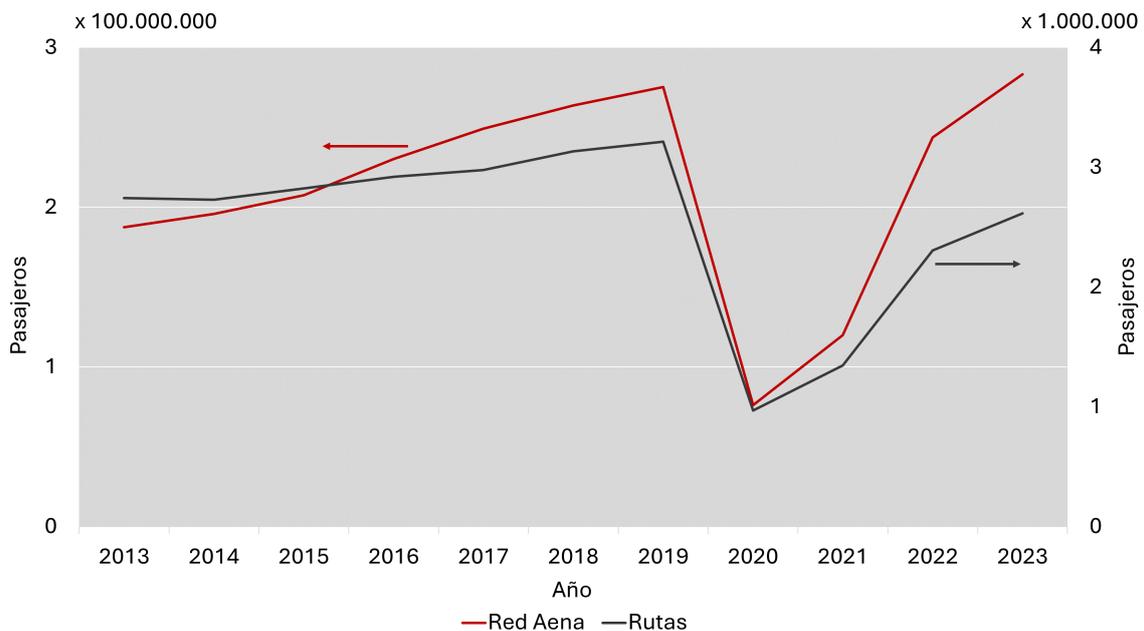
La última parte de la figura muestra una caída muy pronunciada, mucho mayor que las anteriores, relacionada con la pandemia de COVID-19, en el que el tráfico aéreo mundial sufrió importantes restricciones en los años 2020 y 2021.

Esta figura refleja la resiliencia del tráfico aéreo ante las crisis mencionadas. La capacidad de recuperarse después de eventos adversos significativos muestra la importancia y la demanda constante del transporte aéreo a nivel mundial. Además, implica la presencia de mecanismos de recuperación en la industria, como la adaptación a nuevas condiciones de mercado, la consolidación de aerolíneas y la implementación de medidas de seguridad y salud para restaurar la confianza del pasajero.

Tras el análisis del tráfico aéreo mundial se puede sacar la primera hipótesis para la prognosis de las rutas a estimar: el tráfico aéreo, pese a crisis puntuales, sigue una tendencia positiva, por lo tanto, se deduce que el tráfico aéreo de las 3 rutas seleccionadas seguirán también en aumento.

### Tráfico aéreo nacional

Comparando el tráfico total de pasajero de las tres rutas seleccionadas con el tráfico de pasajeros de la red de Aena, se observa en la figura 11 que tienen tendencias muy similares, desde 2013 a 2019 el crecimiento de las tres rutas seleccionadas ha sido algo menor que el de la red. La afección por el COVID-19 ha sido muy parecida en ambas tendencias, con caídas relativas prácticamente iguales, por último, ambas tendencias han empezado a recuperarse con cierta rapidez a partir del 2021, aunque se destaca que la red de Aena ya ha superado los valores previos al covid (2019), mientras que a las 3 rutas seleccionadas aún le falta. Esto es un claro indicador de que el crecimiento de las tres rutas es inferior al de la red.



**Figura 11:** Pasajeros red Aena y tráfico de pasajeros de las rutas seleccionadas 2013-2023. Fuente: Statista [75] y Aena [30].

Se puede extraer como hipótesis que la tendencia de ambos conjuntos de datos es muy similar, al fin y al cabo las 3 rutas forman parte de la red de Aena. Por lo tanto, sería lógico aplicar una prognosis realizada para la red de Aena a las tres rutas seleccionadas.

## PIB nacional

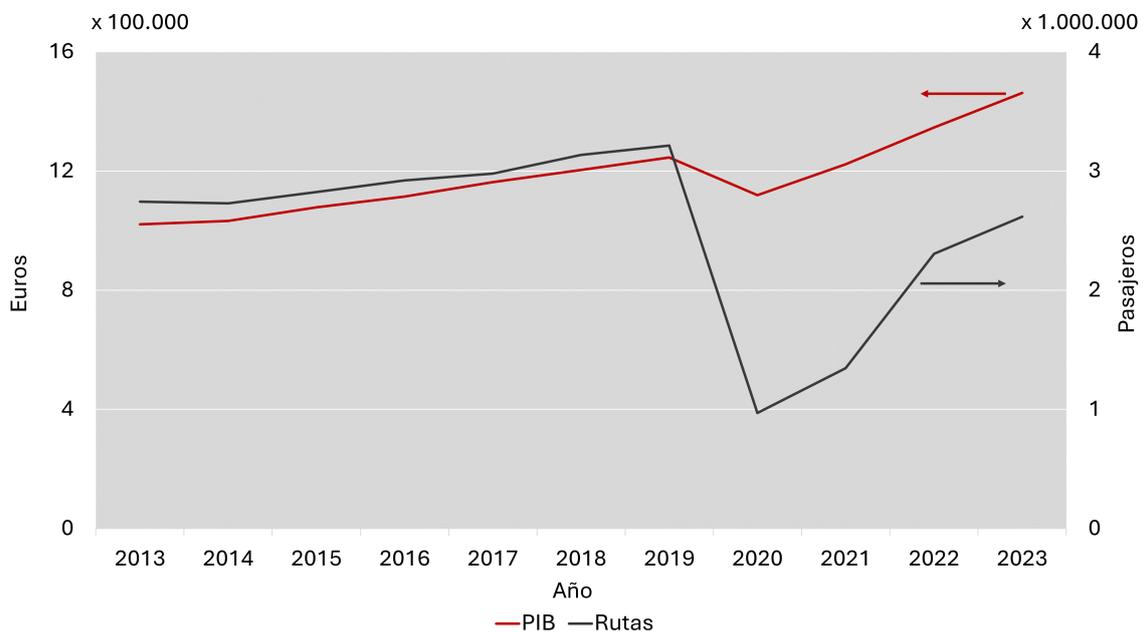
Un indicador que suele analizarse para comparar con el tráfico aéreo es la economía local de la zona en cuestión, es decir, el PIB (Producto Interior Bruto). Por ello, en la figura 12 se muestra la evolución del PIB de España y el número de pasajeros anuales en las 3 rutas aéreas seleccionadas, desde 2013 hasta 2023.

Se observa una clara correlación entre las tendencias económicas, representadas por el PIB, y el tráfico aéreo de pasajeros, lo cual es indicativo de cómo la economía nacional puede influir directamente en el sector aéreo.

Desde 2013 hasta 2019, ambas líneas presentan una tendencia al alza, sugiriendo un período de crecimiento económico robusto y un aumento paralelo en el movimiento de pasajeros. Esto puede interpretarse como un reflejo de la confianza del consumidor y la solidez económica que, en conjunto, potencian la demanda de viajes aéreos.

El año 2020 marca un punto de inflexión dramático, donde tanto el PIB como los pasajeros de rutas aéreas sufren una caída significativa, evidenciando el impacto negativo de la pandemia de COVID-19 en la economía y el sector aéreo. La disminución de la actividad económica, acompañada de restricciones de viaje y la consiguiente reducción de la confianza del consumidor, se traduce en una disminución de los viajes aéreos.

A partir de 2021, se evidencia un rebote en ambas métricas, que puede interpretarse como una señal de recuperación. Esta recuperación es más acusada en el número de pasajeros que en el PIB, lo que podría deberse a la liberación de la demanda reprimida de viajes tras el levantamiento de las restricciones.



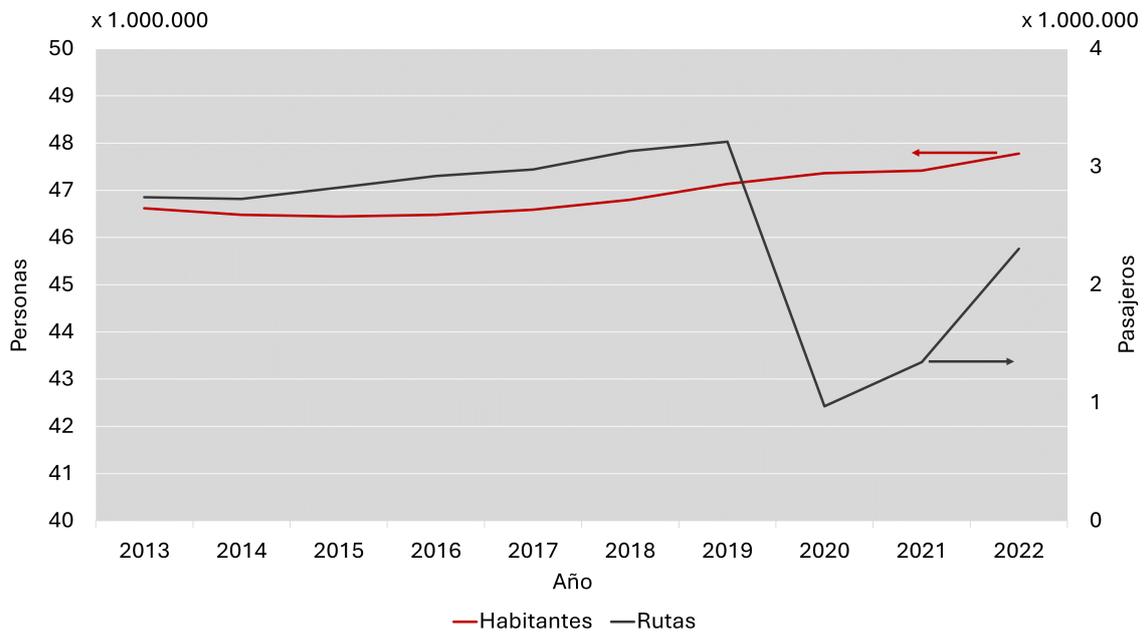
**Figura 12:** PIB anual de España y tráfico de pasajeros de las rutas seleccionadas 2013-2023. Fuente: Statista [75] y Aena [73].

De este análisis se puede sacar como relación una tendencia similar, lo que se traduce en poder aplicar la tendencia del crecimiento del PIB al tráfico de estas tres rutas. Estas tres rutas conectan a la capital del país con 3 ciudades importantes, por lo cual es lógico que sean dependientes de la economía nacional.

### Número de habitantes

Por último, se compara el tráfico aéreo de las tres rutas con el análisis demográfico nacional, es decir, la evolución del número de habitantes de España. La figura 13 presenta la evolución de la población de España y el número de pasajeros de las 3 rutas aéreas seleccionadas entre los años 2013 y 2022.

Al comparar ambos conjuntos de datos, se pueden sacar ciertas similitudes en sus tendencias, pero la realidad es que se observa una mayor diferencia entre las dos variables: la población mantiene una tendencia relativamente constante con una leve disminución en el 2020. Por su parte, para los pasajeros el año 2020 destaca por una caída drástica, que claramente coincide con el comienzo de la pandemia de COVID-19 y las consecuentes restricciones a la movilidad.



**Figura 13:** Habitantes de España y tráfico de pasajeros de las rutas seleccionadas 2013-2022. Fuente: Banco Mundial [76] y Aena [73].

Tras este análisis, se concluye que es difícil poder extraer una hipótesis razonable para la prognosis al relacionar los habitantes de España con el tráfico de las 3 rutas.

### 2.1.5 Prognosis de tráfico aéreo

Una vez presentadas las hipótesis para poder aplicar a la prognosis del tráfico aéreo de las 3 rutas, se puede proceder con la prognosis. Es decir, a estimar el tráfico de pasajeros para las 3 rutas afectadas basándose en las hipótesis destacadas en el párrafo anterior y considerando los horizontes presentados. Para ello, se van a estimar tres escenarios: un escenario bajo en el que se supondrá que el tráfico contará con crecimiento reducido; uno alto, el que el tráfico contará con las mejores condiciones de crecimiento y uno medio, que será finalmente el que se aplicará a las rutas y situado entre los dos anteriores.

Para la realización de la prognosis se decide aplicar las hipótesis anteriores de forma simple, puesto que no es más que una estimación y siguiendo la navaja de ocklam: “*la explicación más simple y suficiente es la más probable*”.

#### Escenario de tráfico bajo

Tal y como se justificó anteriormente, se procede a aplicar el incremento anual del PIB al tráfico de pasajeros de las 3 rutas.

A partir de la información presentada, se elabora una prognosis utilizando las estimaciones de crecimiento del PIB publicadas en la página web *Statista* [77]. Esta proyección se sustenta en la tendencia similar observada entre el PIB nacional y el tráfico de pasajeros, con patrones de crecimiento notablemente similares en los últimos años.

Las estimaciones del PIB para los próximos años en España indican variaciones anuales del 1,97 %, 2,04 %, 1,71 %, 1,66 % y 1,58 % para los años 2024 a 2028 respectivamente. Dada la complejidad de predecir el PIB, no se extienden las proyecciones más allá de cinco años. Utilizando estos datos, se ha proyectado el tráfico de pasajeros de las tres rutas hasta 2028.

Finalmente, se ha llevado a cabo una extrapolación lineal, que se ha ajustado con gran precisión a los datos existentes ( $R^2 = 0,9985$ ). Los parámetros obtenidos para este modelo de extrapolación son  $a = 48.626,70311$  y  $b = 2.571.049,85651$ . Con estos valores, se ha proyectado el tráfico aéreo de pasajeros hasta el año 2050. Esta proyección se puede visualizar en la figura 14.

#### Escenario de tráfico alto

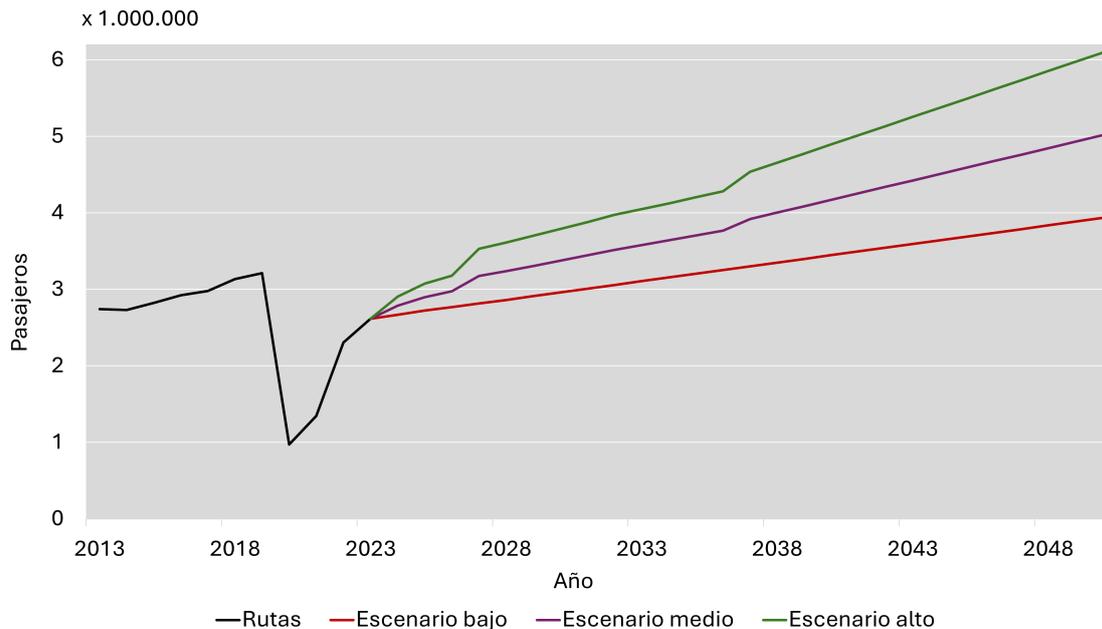
El próximo paso consiste en generar una prognosis considerando un escenario de tráfico alto. Para ello, se ha optado por seguir los incrementos de tráfico en las previsiones de tráfico aéreo realizadas por Aena hasta 2036 para toda la red y aplicarlos directamente a las 3 rutas. Estos datos han sido divulgados por el gobierno en el Documento de Regulación Aeroportuaria (DORA) [78], este informe detalla los volúmenes de tráfico total de Aena año tras año hasta 2027, incluyendo también proyecciones para 2032 y 2036. Para rellenar los datos faltantes entre 2027 y 2036, se ha efectuado una interpolación lineal y, posteriormente, se ha extendido la serie temporal a través de una extrapolación lineal con los datos de 2023 a 2036 para estimar los valores hasta 2050. Esta extrapolación presenta una  $R^2 = 0,9461$  y unos parámetros de  $a = 119.792,16201$  y  $b = 2.737.922,49671$ . La proyección hasta 2050 podrá verse en la figura 14.

## Escenario de tráfico medio

Para terminar la prognosis de tráfico aéreo se ha calculado un escenario de tráfico medio realizando la media aritmética de los dos escenarios anteriores, basándose en que el crecimiento de las tres rutas está por debajo del crecimiento de la red.

### Prognosis de pasajeros, 2024-2050

Una vez presentados los tres escenarios de la prognosis, se presenta en la figura 14 la evolución en el número de pasajeros hasta 2050 de las tres rutas seleccionadas.



**Figura 14:** Prognosis del tráfico aéreo de pasajeros hasta 2050.

Se puede observar que el escenario alto es bastante optimista, superando el tráfico anual de pasajeros de 2019 en 2027 y con dos aumentos pronunciados en 2027 y 2037, este escenario se basa en la previsión de Aena, por lo que se debe recordar que la red ya superó los valores de tráfico de 2019 en 2023, mientras que los de la ruta siguen por debajo del año record (2019).

En cuanto al escenario bajo, se considera quizás demasiado conservador, con un crecimiento lineal y limitado, este escenario se basa en el crecimiento de la economía nacional, la cual puede estar más lastrada a crecer que el tráfico aéreo.

Comparando los dos escenarios anteriores, gana enteros el escenario medio, ya que sitúa el crecimiento de las tres rutas por debajo del de la red, lo cual se vio al comparar el tráfico de las tres rutas con el de la red y resalta el crecimiento del tráfico aéreo de las tres rutas, por encima de la economía nacional, la cual puede estar más lastrada por factores externos, mientras que el tráfico aéreo puede verse menos limitada a un mayor crecimiento.

### 2.1.6 Demanda esperada

Se presentan ahora los valores concretos de pasajeros y operaciones en los horizontes de estudios.

#### Demanda esperada de pasajeros

Una vez calculada la demanda de pasajeros esperada para el total de las tres rutas seleccionadas (MAD-ALC, MAD-BCN y MAD-VLC), se procederá a especificar los pasajeros para cada ruta por separado. Para simplificar estas aproximaciones se decide mantener la misma proporción que para los pasajeros totales en 2023, esto es: la ruta MAD-ALC supone un 12,43 % del total; la ruta MAD-BCN supone un 73,93 % y la ruta MAD-VLC supone el 13,64 % restantes, esta proporción se mantendrá para todo el periodo calculado (2024-2050).

Se presentan los pasajeros estimados de la ruta Madrid-Alicante para los horizontes de estudio:

Año	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
2024	331.674	346.473	361.273
2030	368.044	419.509	470.975
2050	488.965	623.218	757.470

**Tabla 5:** Prognosis de pasajeros para la ruta MAD-ALC.

Se presentan los pasajeros estimados de la ruta Madrid-Barcelona para los horizontes de estudio:

Año	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
2024	1.972.116	2.060.114	2.148.112
2030	2.188.371	2.494.383	2.800.395
2050	2.907.364	3.705.623	4.503.883

**Tabla 6:** Prognosis de pasajeros para la ruta MAD-BCN.

Se presentan los pasajeros estimados de la ruta Madrid-Valencia para los horizontes de estudio:

Año	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
2024	363.761	379.992	396.223
2030	403.649	460.094	516.538
2050	536.269	683.509	830.750

**Tabla 7:** Prognosis de pasajeros para la ruta MAD-VLC.

## Demanda esperada de operaciones

Para la demanda de operaciones, se recurre a los datos presentados a principio de esta apartado, con los datos de operaciones y pasajeros, se calcula la ocupación media por aeronave de cada ruta en 2023, resultando: 87 para la ruta MAD-ALC; 149 para la ruta MAD-BCN y 83 para la ruta MAD-VLC. Se decide mantener esta ocupación para los años proyectados.

Se presentan las operaciones estimadas de la ruta Madrid-Alicante para los horizontes de estudio:

Año	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
2024	3.812	3.982	4.153
2030	4.230	4.822	5.414
2050	5.620	7.163	8.707

**Tabla 8:** Prognosis de operaciones para la ruta MAD-ALC.

Se presentan las operaciones estimadas de la ruta Madrid-Barcelona para los horizontes de estudio:

Año	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
2024	13.236	13.826	14.417
2030	14.687	16.741	18.795
2050	19.513	24.870	30.227

**Tabla 9:** Prognosis de operaciones para la ruta MAD-BCN.

Se presentan las operaciones estimadas de la ruta Madrid-Valencia para los horizontes de estudio:

Año	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
2024	4.383	4.578	4.774
2030	4.863	5.543	6.223
2050	6.461	8.235	10.009

**Tabla 10:** Prognosis de operaciones para la ruta MAD-VLC.

### 2.1.7 Selección de las aeronaves de referencia

Como último resultado dentro de este apartado, se definirá la aeronave representativa para estas rutas, la cual será vital en el análisis del ciclo de vida del siguiente apartado.

En la figura 9 se presentaron las 5 aeronaves con mayor presencia en estas rutas en los últimos años, destacando el A320, el CRJ-1000 y el A321. Para elegir la aeronave representativa de cada horizonte, se muestra en la tabla 11 el incremento en el uso de cada modelo de aeronave en 2023 con respecto al 2019 (primer año de servicio del A320 NEO).

Modelo	2019	2023	Incremento
A320	7.462	5.231	0,70
A320 NEO	2.040	2.774	1,36
A321	3.775	1.556	0,41
ATR-72	3.082	521	0,17
CRJ-1000	5.681	4.445	0,78

**Tabla 11:** Incremento en el uso de cada modelo de aeronaves en 2023 con respecto a 2019. Fuente: Aena [73].

A corto plazo (2023) se elige el A320, puesto que fue la aeronave más utilizada en 2023 y poco indica que esto cambiará en 2024. Para el medio plazo se observa como el A320 NEO es la única aeronave con una tendencia positiva en cuanto a su uso, por lo que es lógico pensar que será la aeronave más utilizada en estas rutas dentro de pocos años (medio plazo). A largo plazo se puede esperar que directamente no sea ninguno de estos modelos de aeronaves, si no una aeronave aún por desarrollar y con un combustible muy diferente a los actuales. Debido a esta alta complejidad, a largo plazo se establecerá igualmente el A320 NEO.

## 2.2 Fase 2: análisis de ciclo de vida

En este apartado se realizará el análisis del ciclo de vida (LCA, Life Cycle Assessment) de los tres principales modos de transporte para realizar las rutas afectadas por la propuesta de ley, es decir, en avión, en AVE y en coche. Se destaca que del transporte por carretera solo se considera el coche, ya que los pasajeros que no puedan viajar en avión (medio de transporte cómodo y rápido), buscarán una alternativa lo más parecida posible. Además, de esta forma se evalúa el contexto más crítico posible en cuanto a emisiones por carretera.

El objetivo será poder cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por cada modo de transporte, tras un análisis de ciclo de vida completo (cradle-to-grave), que contemplará:

- La fabricación y retirada del vehículo.
- La producción del combustible.
- La operación del vehículo.

En un análisis del ciclo de vida, el primer paso implica la definición de los escenarios relevantes, que incluyen la combinación de combustibles, el tiempo y la ubicación geográfica. Estos elementos son cruciales ya que afectan las emisiones tanto en la fabricación del vehículo como en la producción de combustible. A continuación, se establecen los límites y flujos ambientales para identificar los procesos involucrados en el ciclo de vida del vehículo, así como las entradas y salidas que impactan el medio ambiente. Posteriormente, se elige la unidad funcional, que representa la cantidad de emisiones consideradas en el estudio. Por ejemplo, si la unidad funcional es un vehículo operando durante 150.000 km, todas las emisiones se relacionarán con la fabricación y operación de un vehículo durante esa distancia. Las categorías de impacto se definen para cuantificar los efectos ambientales evaluados en el estudio. Finalmente, se presenta el inventario del ciclo de vida (LCI, Life Circle Inventory), que detalla los datos y sus fuentes utilizadas en el LCA. [79]

En este estudio, la metodología se enfoca exclusivamente en evaluar el impacto medioambiental de la propuesta de ley a través de cuantificar los gases de efecto invernadero (GEI), dado que el objetivo principal de la limitación de rutas aéreas es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Considerar otras categorías de impacto en los múltiples escenarios analizados resultaría en una comprensión limitada de los resultados.

### 2.2.1 Definición de escenarios

Se presentan a continuación los escenarios considerados para este estudio:

- Geográfico: Europa, ya que aunque la propuesta de ley se define para España, nace a partir de normativa Europa [13], además, Francia ya la está aplicando, pudiendo surgir más países Europeos con intención de promulgarla. Por otro lado, ciertas entradas serán muy difíciles de especificar para España, por ejemplo, las aeronaves Airbus se fabrican en Europa [80, 81], además de que la diferencia entre la intensidad de carbono de la mezcla eléctrica de Europa y España, es tan solo del 5% [82].
- Temporal: 2024, 2030 y 2050. Son los horizontes de estudio definidos y justificados en el subapartado 2.1.1.
  - Impacto 1: 6% uso de SAF. [6]

- Impacto 2: 70 % uso de SAF. [6]

### 2.2.2 Límites y flujos ambientales

Los límites de un análisis del ciclo de vida establecen los procesos que participan en las rutas de producción y que contribuyen al impacto ambiental en estudio. [79]

Los flujos que provienen directamente del entorno, como materias primas o contaminantes, se denominan flujos ambientales. La figura 15 presenta los límites y flujos ambientales considerados en este estudio. Estos límites abarcan desde la extracción y procesamiento de materias primas, hasta el reciclaje del vehículo, pasando por su uso en la fase operativa y la producción del combustible, es decir, para un LCA de la cuna a la tumba (cradle-to-grave). Las emisiones serán calculadas con el uso de GREET®.

Se destaca que en la producción del combustible de la aeronave y el coche, se considera el mismo proceso, que no el combustible en sí, el “combustible” del tren de alta velocidad considerado es energía eléctrica renovable.

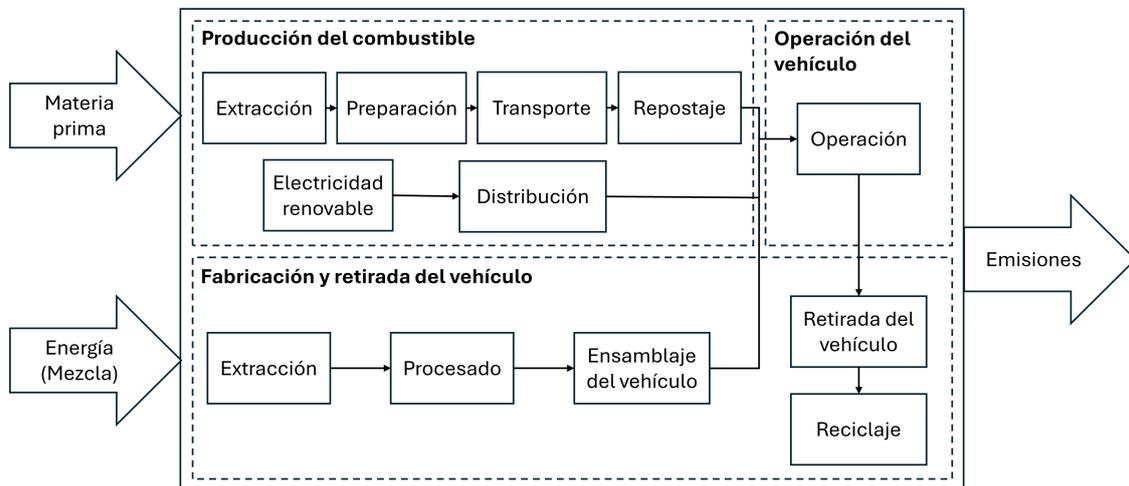


Figura 15: Límites del sistema y flujos ambientales.

### 2.2.3 Unidad funcional y categoría de impacto

La unidad funcional en este estudio varía según la fase específica del ciclo de vida que se esté examinando:

- Durante las fases de fabricación y retirada del vehículo, la medida estándar es la utilización de 1 vehículo (un avión, un tren de alta velocidad o un coche).
- Para la fase de producción del combustible y la fase de operación del vehículo, se considera como unidad funcional el total de operaciones que puede realizar cada vehículo en su esperanza de vida, considerando que tanto el tren como el avión realizan 4 viajes diarios, todos los días del año y durante 25 años para el avión y 30 años para el tren. Además, se considera como distancia la media de un trayecto entre Madrid-Barcelona, Madrid-Valencia y Madrid-Alicante, ponderada con el número de operaciones de cada ruta en 2023, dando un resultado de 422 km para el avión y 539 km para el ave. En el caso del coche, la unidad funcional son 150.000 km.

La categoría de impacto seleccionada son los gases de efecto invernadero con un horizonte temporal de 100 años (GEI-100). No se incluyen otras categorías de impacto, ya que el objetivo del análisis es cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por cada modo de transporte, para evaluar el impacto medioambiental de la propuesta de ley. Además, los GEI fueron considerados porque reducir el calentamiento global es el principal objetivo detrás de la propuesta de ley [6]. Por lo tanto, enfocar el estudio en esta categoría de impacto es completamente coherente con los objetivos planteados.

#### 2.2.4 *Inventario del ciclo de vida (LCI)*

Para una aeronave A320, se consideran los materiales y proporciones especificadas en la tabla 12.

Material	Presencia (%)	Presencia (kg)
Aluminio	60	23.548
Compuestos	15	5.830
Acero	10	3.860
Titanio	9	3.445
Níquel	5	1.808
Otros	2	689
Total	100	39.180

**Tabla 12:** Composición por materiales del A320 *Fuente: K. Rendigs and M. Knüwer [83] y A. García [84].*

Para el A320 NEO, se considera la misma proporción de materiales, ya que de acuerdo con Airbus [80, 81] los componentes de ambas versiones de aeronaves son muy similares.

Para el AVE no ha sido posible encontrar esta información, por lo que se consideran los materiales y proporciones del InterCity Express (Tren de alta velocidad utilizado en Alemania), considerando el peso máximo del modelo de AVE S-130 conocido, además, tal y como indica Renfe, el modelo S-103 se basa en el ICE alemán [85]. Los materiales y proporciones considerados se recogen en la tabla 13.

Material	Presencia (%)	Presencia (kg)
Acero reforzado	36	152.484
Polietileno	24	101.004
Aluminio	14	58.648
Acero de baja aleación	14	57.866
Cristal	8	32.582
Cobre	5	22.416
Total	100	425.000

**Tabla 13:** Composición por materiales del Tren de Alta Velocidad *Fuente: Ecoinvent [86] y Renfe [85].*

Para el LCA del coche, se recurrirá a los resultados del artículo de J.M. Desantes, et al. [87].

Para considerar los procesos de los distintos materiales, se recurrirá a la base de datos de GREET® v2023, mientras que para estimar el mix energético y, por tanto las emisiones asociadas a la fabricación de los vehículos en 2024-2050 y la producción de electricidad, se ha empleado el inventario de ciclo de vida GaBi.

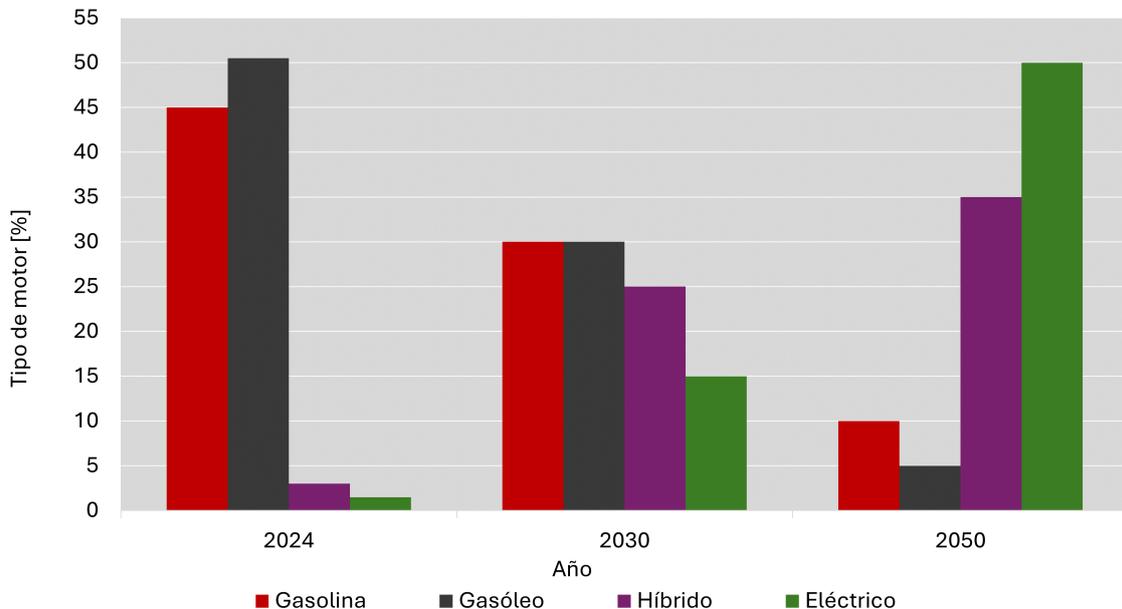
### 2.2.5 Limitaciones e hipótesis

El principal objetivo del documento es poder comparar las emisiones de GEI de los distintos modos de transporte para evaluar la efectividad de la propuesta de ley.

A continuación, se presentan las hipótesis más relevantes tenidas en consideración para la realización de este análisis:

- El análisis del ciclo vida a realizar será completo (Cradle-to-Grave), considerando cada una de sus fases de vida útil, es decir, considerando la fabricación, operación y retirada de la aeronave, además de la producción del combustible.
- Se han realizado diversas simplificaciones para facilitar la elaboración del estudio, el objetivo principal es poder comparar las emisiones de los distintos modos de transporte, por lo que no es necesario una gran precisión.
- Se omiten las emisiones derivadas de los procesos de fabricación de la maquinaria y dispositivos empleados en la generación de fuentes de energía y la producción de vehículos. También se descuidan las emisiones generadas durante el transporte de materiales entre fábricas para el ciclo de fabricación del vehículo. Estas omisiones se consideran insignificantes en el contexto de las emisiones totales del ciclo de vida de los vehículos, ya que la maquinaria en cuestión se utiliza constantemente.
- Se considera el mismo modelo de tren de alta velocidad para los tres horizontes de estudios, ya que el establecer distintos modelos de tren para cada horizonte de estudio daría para otro TFM.
- Para los vehículos en carretera, se considera un turismo, ya que sería el coche predominante a la hora de realizar esta ruta para pasajeros que se vieran obligados a dejar de realizar el viaje en avión y optasen por el coche, en lugar del tren. Además, de esta forma se considera el escenario más crítico en cuanto a emisiones.
- El SAF considerado es el producido a partir de Miscanthus utilizando el proceso de conversión de alcohol (isobutanol) a combustible de aviación (ATJ), ya que esta tecnología está siendo desarrollada y promovida en Europa para diversificar y aumentar la producción de combustibles sostenibles, con proyectos clave como el FLITE liderado por SkyNRG y LanzaTech. [88, 89]
- No se ha considerado combustible sostenible para automoción (algo similar al SAF para las aeronaves), debido a que las políticas europeas priorizan la electrificación como la vía principal para descarbonizar el transporte por carretera, de acuerdo con la Comisión Europea [90] y el ICCT [91].
- Para simplificar la comparativa, en la mezcla de vehículos solo se van a considerar gasóleo, gasolina, híbrido y eléctricos, ya que son las 4 tecnologías más dominantes, el resto de tecnologías, por similitud en cuanto a emisiones, se considerarán eléctricos. La mezcla de tecnología considera por cada horizonte de estudio es:

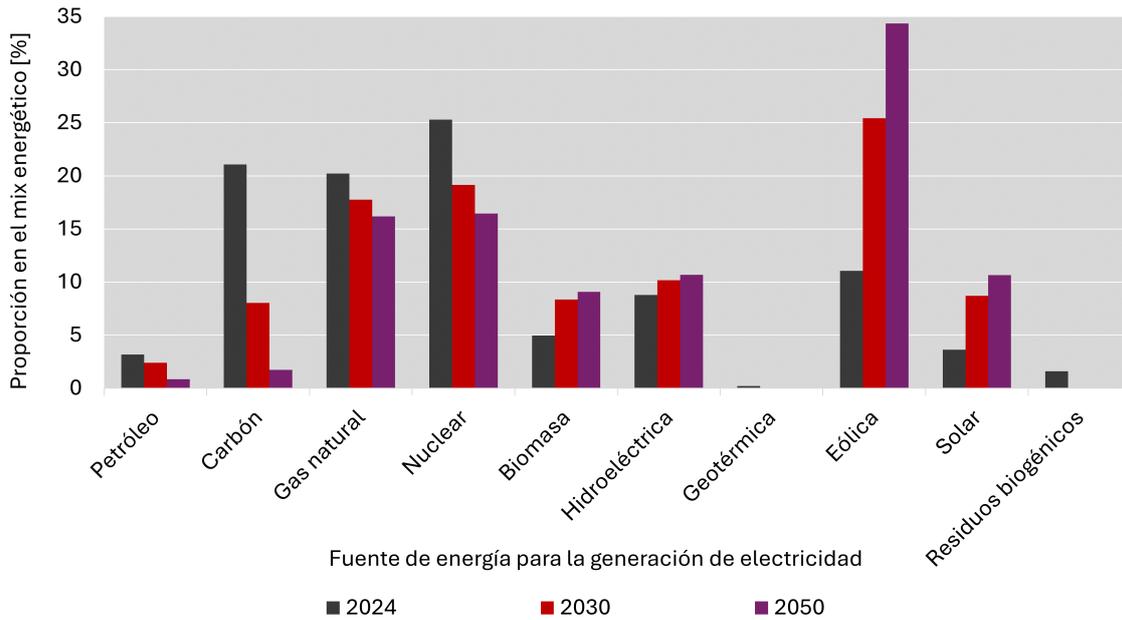
- **2024.** Con datos de la GDT [92], se considera un 50,5 % gasóleo, un 45 % gasolina, un 3 % híbrido y un 1,5 % eléctrico, que fue la flota presente en 2022.
- **2030.** Se estima una flota de 30 % gasóleo, 30 % gasolina, 25 % híbrido y 15 % eléctrico. Se estima que la proporción combinada de vehículos de gasolina y diésel podría seguir siendo superior al 50 % para 2030 debido al lento ritmo de desarrollo de la infraestructura y al tiempo necesario para que la adopción de vehículos eléctricos por parte de los consumidores alcance niveles significativos. [93, 94]
- **2050.** Ya sí habrá un claro dominio de coches eléctricos, mientras que los coches de combustión interna representarán en torno al 15 %, la flota considerada es gasóleo 5 %, gasolina 10 %, 35 % híbrido y 50 % eléctrico. Ya que una adopción casi total de vehículos de cero emisiones para 2050 es el camino para lograr los objetivos marcados. [95]
- En la figura 16 se puede observar estas distribuciones en forma de gráfica de barras por año.



**Figura 16:** Mezcla de tecnologías de motor de vehículos consideradas. *Fuente: DGT [92], ICIS [93] y BCG [94].*

A continuación se recogen todas las variaciones que se tendrán en consideración en los diferentes escenarios temporales (2024, 2030 y 2050).

- **Cambio en mix energético:** en la figura 17 se puede ver que la proporción considerada de fuentes de energía para el mix energético para los años 2024, 2030 y 2050. En general, hay una tendencia hacia un aumento en el uso de fuentes de energía renovables (eólica y solar) y una disminución en el uso de combustibles fósiles (petróleo y carbón). Esta información ha sido obtenida a través del software de análisis de ciclo de vida GaBi. Esta mezcla tiene un valor significativo ya que afecta a las emisiones en la fase de producción de los vehículos y a la fase de producción de electricidad para el AVE.



**Figura 17:** Proyección del mix energético por fuente de energía para 2024, 2030 y 2050. Fuente: GaBi.

- Porcentaje de SAF utilizado: en 2024 un 0 %, en 2030 un 6 % y en 2050 un 70 %.
- Número de pasajeros: 2.786.579 en 2024, 3.373.986 en 2030 y 5.012.350 en 2050.
- Número de operaciones: 22.387 en 2024, 27.106 en 2030 y 40.268 en 2050.
- Composición de la flota de vehículos de carretera: 50,5 % de gasóleo, 45 % de gasolina, 3 % híbrido y 1,5 % eléctrico en 2024; 30 % de gasóleo, 30 % de gasolina, 25 % híbrido y 15 % eléctrico en 2030 y 5 % de gasóleo, 10 % de gasolina, 35 % híbrido y 50 % eléctrico en 2050.
- Aeronave de referencia: para 2024 se considera un A320, mientras que para 2030 y 2050 un A320NEO, el cual es un 20 % más eficiente en cuanto a consumo de combustible.

### 2.2.6 Impacto ambiental. A320 - 2024

Se procede a explicar cómo se estima el impacto ambiental (medido en emisiones de GEI) de la aeronave A320 en el 2024 en cada una de sus fases del ciclo de vida.

#### Fabricación y retirada del vehículo

Conocidos los materiales y proporciones de una aeronave A320, se utiliza el software GREET® v2023, para calcular las emisiones de GEI asociadas a la fabricación y retirada del vehículo en 2024. De esta forma, se tienen las emisiones asociadas por materia prima en la tabla 14:

Materia prima	kg	kg CO <sub>2</sub> eq./kg	kg CO <sub>2</sub> eq.
Aluminio	23.548	14,08	331.612
Compuestos	5.830	15,09	88.002
Acero	3.860	2,13	8.224
Titanio	3.445	48,33	166.489
Níquel	1.808	11,10	20.061
Otros	689	15,96	10.998
<b>Total</b>	<b>39.180</b>		<b>625.385</b>

**Tabla 14:** Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un A320 - 2024.

#### Producción del combustible

Para estimar el consumo de combustible total durante la vida de una aeronave A320, se estima una esperanza de vida de 25 años, con una rotación de 4 vuelos por día, da un total de 36.500 vuelos.

Por otro lado, se hace necesario estimar un consumo medio de combustible para una ruta comercial similar a las del objeto de este estudio, esto es, una duración total de 70 minutos de duración (incluidos los rodajes en tierra). Los tiempos se han estimado gracias a la media de vuelos realizados en estas rutas y observados a través de FlighRadar [96], mientras que el consumo se ha sacado de la revista ATC Magazine [97]. Se presenta en la tabla 15 los consumos de combustible por fase de vuelo considerados y el total asociado a cada vuelo regional.

Fase	Consumo (kg/hora) [97]	Tiempo (min) [96]	Consumo (kg)
Rodaje	600	10	100
Ascenso	5.000	15	1.250
Crucero	2.250	20	750
Descenso	450	15	112,5
Rodaje	600	10	100
<b>Total</b>			<b>2.312,5</b>

**Tabla 15:** Consumo de combustible medio de las rutas.

Con un consumo medio de 2.312,5 kg por vuelo y considerando 36.500 vuelos en los 25 años de vida de la aeronave, se obtiene un consumo total de combustible de 84.406.250 kg de combustible, que para 2024 se considera 100 % JET A1. Gracias al factor de conversión de la ICAO [98], 0,64 kg  $CO_2$  eq. / kg para esta fase del ciclo de vida, se obtienen las emisiones asociadas al ciclo de vida de la producción de combustible, presentadas en la tabla 16.

Combustible	kg	kg $CO_2$ eq./kg [98]	kg $CO_2$ eq.
Jet A1	84.406.250	0,667	56.298.969
Total	84.406.250		56.298.969

**Tabla 16:** Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de combustible para un A320 - 2024.

### Operación del vehículo

Para la operación del vehículo, se parte de la cantidad de combustible necesaria para la esperanza de vida, es decir, 84.406.250 kg de Jet A1. Las emisiones en esta fase provienen de la quema del combustible en el motor, se ha considerado el factor de conversión a GEI-100 facilitado por la ICAO [98] para esta fase, 3,16 kg  $CO_2$  eq. / kg. De esta forma se obtiene el resultado presentado en la tabla 17.

Combustible	kg	kg $CO_2$ eq./kg [98]	kg $CO_2$ eq.
Jet A1	84.406.250	3,16	266.723.750
Total	84.406.250		266.723.750

**Tabla 17:** Emisiones GEI-100 asociadas a la operación de un A320 - 2024.

### 2.2.7 Impacto ambiental. A320 NEO - 2030

#### Fabricación y retirada del vehículo

Conocidos los materiales y proporciones de una aeronave A320 NEO, se utiliza el software GREET<sup>®</sup> v2023, para calcular las emisiones de GEI asociadas a la fabricación y retirada del vehículo en 2030. De esta forma, se tienen las emisiones asociadas por materia prima en la tabla 18:

Materia prima	kg	kg CO <sub>2</sub> eq./kg	kg CO <sub>2</sub> eq.
Aluminio	23.548	13,69	322.456
Compuestos	5.830	11,44	66.697
Acero	3.860	1,95	7.514
Titanio	3.445	42,75	147.286
Níquel	1.808	10,84	19.605
Otros	689	14,64	10.088
<b>Total</b>	<b>39.180</b>		<b>573.646</b>

**Tabla 18:** Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un A320 NEO - 2030.

#### Producción del combustible

El consumo medio del A320 era de 2.312,5 kg / trayecto, de acuerdo con Airbus [81], el A320 NEO consigue un 20 % menos de consumo que su versión anterior, por lo que se estima el consumo medio del A320 NEO en 1850 kg de combustible / trayecto, considerando, igual que antes, 36.500 vuelos a lo largo de 25 años de operación, se obtienen 67.525.000 kg de combustible necesarios.

Por otro lado, tal y como se ha indicado anteriormente, en 2030 se considerará obligatorio que un mínimo de 6 % del combustible sea SAF. A partir de estimaciones de la ICAO, se ha calculado el factor de conversión para la fase de producción de combustible del SAF. ICAO proporciona un factor de emisiones del ciclo de vida de 12,4 gCO<sub>2</sub>e/MJ [98] (considerando que el SAF se produce a partir de Miscanthus, utilizando el proceso de conversión de alcohol (isobutanol) a combustible de aviación), este factor de emisiones del ciclo de vida hace referencia a:

- Emisiones del ciclo de vida principal, asociadas con:
  - El cultivo, la cosecha, la recolección y la recuperación de materias primas, el procesamiento y la extracción, el transporte a las instalaciones de procesamiento y producción de combustible.
  - Los procesos de conversión de materias primas a combustible, el transporte y la distribución del combustible y la combustión del combustible en el motor de una aeronave.
- Emisiones por cambio indirecto del uso de la tierra, asociadas con:
  - Gases de efecto invernadero liberados por la conversión de vegetación natural (bosques, otras tierras naturales), carbono orgánico del suelo, oxidación de turberas y biomasa secuestrada. Estas emisiones pueden ocurrir donde se está

llevando a cabo la producción (cambio directo del uso de la tierra), pero también en otros lugares debido al desplazamiento de cultivos (o animales) para los cuales la tierra se utilizaba anteriormente (cambio indirecto del uso de la tierra).

Es decir, el factor de emisiones del ciclo de vida hace referencia a las fases de producción de combustible, el uso en la aeronave y la mitigación de  $CO_2$  durante su crecimiento.

Conocido este factor y considerando un valor de energía específica de 43 MJ / kg, se obtiene un valor de 0,5332 kg  $CO_2$  / kg, para el ciclo de vida completo. Además, considerando que el JET y el SAF son iguales en cuanto a composición química, el factor de conversión para la fase de operación (combustión) será el mismo, 3,16 kg  $CO_2$  / kg [98].

Por último, la diferencia entre ambos valores es el factor de emisión para la fase de producción de SAF: -2,627 kg  $CO_2$  / kg. con el que se obtienen las emisiones asociadas al ciclo de vida del combustible, tal y como se presentan en la tabla 19.

Combustible	kg	kg $CO_2$ eq./kg [98]	kg $CO_2$ eq.
Jet A1	63.473.500	0,667	42.336.825
SAF	4.051.500	-2,627	-10.642.480
Total	67.525.000		31.694.344

**Tabla 19:** Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de combustible para un A320 NEO - 2030.

Se destaca que el factor de conversión de las emisiones del ciclo de producción del SAF es negativo debido a que el SAF considerado se produce a partir de Miscanthus, utilizando el proceso de conversión de alcohol (isobutanol) a combustible de aviación (ATJ). Esta materia prima tiene la capacidad de capturar  $CO_2$  durante su crecimiento, lo que contribuye a una reducción neta de las emisiones. El  $CO_2$  absorbido por las plantas durante la fotosíntesis compensa parcialmente el  $CO_2$  emitido durante la combustión del SAF. [98]

La cantidad de emisiones de capturadas por la producción de SAF variará según la estrategia de producción del mismo. En el estudio se considera la misma estrategia para todos los horizontes de estudios, por lo que el factor de conversión no se verá modificado.

### Operación del vehículo

Se parte de la cantidad de combustible necesaria para la esperanza de vida en 2030, es decir, 63.473.500 kg de Jet A1 y 4.051.500 de SAF. Se consideran el mismo factor de conversión que en el escenario de 2024 para el JET-A1, por su parte el SAF, al ser tener una composición similar, su factor de conversión es idéntico. De esta forma se obtienen los resultados presentados en la tabla 20.

Combustible	kg	kg $CO_2$ eq./kg [98]	kg $CO_2$ eq.
Jet A1	63.473.500	3,16	200.576.260
SAF	4.051.500	3,16	12.802.740
Total	67.525.000		213.379.000

**Tabla 20:** Emisiones GEI-100 asociadas a la operación de un A320 NEO - 2030.

### 2.2.8 Impacto ambiental. A320 NEO - 2050

#### Fabricación y retirada del vehículo

Conocidos los materiales y proporciones de una aeronave A320 NEO, se utiliza el software GREET<sup>®</sup> v2023, para calcular las emisiones de GEI asociadas a la fabricación y retirada del vehículo en 2050. De esta forma, se tienen las emisiones asociadas por materia prima en la tabla 21:

Materia prima	kg	kg $CO_2$ eq./kg	kg $CO_2$ eq.
Aluminio	23.548	13,47	317.196
Compuestos	5.830	9,34	54.461
Acero	3.860	1,84	7.107
Titanio	3.445	39,55	136.258
Níquel	1.808	10,81	19.549
Otros	689	13,89	9.569
<b>Total</b>	<b>39.180</b>		<b>544.140</b>

**Tabla 21:** Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un A320 NEO - 2050.

#### Producción del combustible

Como para 2030, se considera también un A320 NEO, el combustible necesario total es el mismo que en 2030, 67.525.000 kg. En 2050, tal y como se ha indicado anteriormente, se considerará obligatorio que un mínimo del 70 % del combustible sea SAF, por lo que, considerando los mismos factores de conversión que en 2030, se obtiene las emisiones asociadas al ciclo de vida del combustible, tal y como se presentan en la tabla 22.

Combustible	kg	kg $CO_2$ eq./kg [98]	kg $CO_2$ eq.
Jet A1	20.257.500	0,667	13.511.753
SAF	47.267.500	-2,627	-124.162.269
<b>Total</b>	<b>67.525.000</b>		<b>-110.650.517</b>

**Tabla 22:** Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de combustible para un A320 NEO - 2050.

#### Operación del vehículo

Por último, en 2050 se procede de igual forma que en 2030, pero aumentando la proporción de SAF. De esta forma, se obtienen los resultados presentados en la tabla 23.

Combustible	kg	kg $CO_2$ eq./kg [98]	kg $CO_2$ eq.
Jet A1	20.257.500	3,16	64.013.700
SAF	47.267.500	3,16	149.365.300
<b>Total</b>	<b>67.525.000</b>		<b>213.379.000</b>

**Tabla 23:** Emisiones GEI-100 asociadas a la operación de un A320 NEO - 2050.

### 2.2.9 Impacto ambiental. AVE - 2024

#### Fabricación y retirada del vehículo

Conocidos los materiales y proporciones de una AVE, se utiliza el software GREET® v2023, para calcular las emisiones de GEI asociadas a la fabricación y retirada del vehículo en 2024. De esta forma, se tienen las emisiones asociadas por materia prima en la tabla 24:

Materia prima	kg	kg CO <sub>2</sub> eq./kg	kg CO <sub>2</sub> eq.
Acero reforzado	152.484	2,13	324.882
Polietileno	101.004	2,06	207.664
Aluminio	58.648	8,46	495.881
Acero de baja aleación	57.866	2,13	123.289
Cristal	32.582	1,52	49.609
Cobre	22.416	3,45	77.243
<b>Total</b>	<b>425.000</b>		<b>1.278.569</b>

**Tabla 24:** Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un AVE - 2024.

#### Producción del combustible

Para estimar el consumo de combustible total durante la vida de un AVE, se estima una esperanza de vida de 30 años, con una rotación de 4 trayectos por día, da un total de 43.800 viajes.

Se ha calculado la distancia promedio de las 3 rutas que sigue el tren de alta velocidad, dando una distancia promedio de 539 km, por lo que resulta un total de 23.608.200 km. Gracias a GREET® v2023, se presenta en la tabla 25 el total de emisiones GEI producidas durante la producción de la electricidad necesaria.

km	kg CO <sub>2</sub> eq./km	kg CO <sub>2</sub> eq.
23.608.200	0,104	2.461.792

**Tabla 25:** Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de electricidad para un AVE - 2024.

#### Operación del vehículo

Debido a que el AVE es 100 % eléctrico, no se emiten contaminantes en su fase de operación.

### 2.2.10 Impacto ambiental. AVE - 2030

#### Fabricación y retirada del vehículo

Conocidos los materiales y proporciones de una AVE, se utiliza el software GREET<sup>®</sup> v2023, para calcular las emisiones de GEI asociadas a la fabricación y retirada del vehículo en 2030. De esta forma, se tienen las emisiones asociadas por materia prima en la tabla 26:

Materia prima	kg	kg CO <sub>2</sub> eq./kg	kg CO <sub>2</sub> eq.
Acero reforzado	152.484	1,95	296.848
Polietileno	101.004	1,76	177.666
Aluminio	58.648	8,17	478.905
Acero de baja aleación	57.866	1,95	112.651
Cristal	32.582	1,41	45.841
Cobre	22.416	2,81	63.071
<b>Total</b>	<b>425.000</b>		<b>1.174.982</b>

**Tabla 26:** Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un AVE - 2030.

#### Producción del combustible

Igual que para 2024, se estiman un total de 43.800 viajes en una esperanza de vida de 30 años para un AVE. La distancia promedio de las rutas es la misma, por lo que la distancia total que recorrería un AVE en 2030 sería 23.608.200 km.

Por último, gracias a GREET<sup>®</sup> v2023, se presenta en la tabla 27 el total de emisiones GEI producidas durante la producción de la electricidad necesaria.

km	kg CO <sub>2</sub> eq./km	kg CO <sub>2</sub> eq.
23.608.200	0,059	1.393.391

**Tabla 27:** Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de electricidad para un AVE - 2030.

#### Operación del vehículo

Debido a que el AVE es 100 % eléctrico, no se emiten contaminantes en su fase de operación.

### 2.2.11 Impacto ambiental. AVE - 2050

#### Fabricación y retirada del vehículo

Conocidos los materiales y proporciones de una AVE, se utiliza el software GREET® v2023, para calcular las emisiones de GEI asociadas a la fabricación y retirada del vehículo en 2050. De esta forma, se tienen las emisiones asociadas por materia prima en la tabla 28:

Materia prima	kg	kg CO <sub>2</sub> eq./kg	kg CO <sub>2</sub> eq.
Acero reforzado	152.484	1,84	280.746
Polietileno	101.004	1,59	160.430
Aluminio	58.648	8,00	469.155
Acero de baja aleación	57.866	1,84	106.540
Cristal	32.582	1,34	43.679
Cobre	22.416	2,45	54.932
Total	425.000		1.115.481

**Tabla 28:** Emisiones GEI-100 asociadas a la fabricación y retirada de un AVE - 2050.

#### Producción del combustible

Igual que para 2024, se estiman un total de 43.800 viajes en una esperanza de vida de 30 años para un AVE. La distancia promedio de las rutas es la misma, por lo que la distancia total que recorrería un AVE en 2030 sería 23.608.200 km.

Por último, gracias a GREET® v2023, se presenta en la tabla 29 el total de emisiones GEI producidas durante la producción de la electricidad necesaria.

km	kg CO <sub>2</sub> eq./km	kg CO <sub>2</sub> eq.
23.608.200	0,033	779.791

**Tabla 29:** Emisiones GEI-100 asociadas a la producción de electricidad para un AVE - 2050.

#### Operación del vehículo

Debido a que el AVE es 100 % eléctrico, no se emiten contaminantes en su fase de operación.

### 2.2.12 Impacto ambiental. Turismo

Tal y como se adelantó anteriormente, para el LCA del turismo, se recurrirá a los resultados del artículo de J.M. Desantes, et al. [87]. El objetivo de este estudio es realizar el análisis del ciclo de vida (LCA) simplificada desde la cuna hasta la tumba (cradle-to-grave) que compare las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y NOX de las tecnologías de H2, eléctricas y convencionales para el sector automotriz en Europa.

### 2.3 Fase 3: comparativa

El objetivo de esta fase es poder determinar si la propuesta de ley es beneficiosa desde el punto de vista ambiental, esto se realizará a partir de comparar las emisiones GEI en dos supuestos:

- **La propuesta de ley no entra en vigor.** En este supuesto, todos los pasajeros calculados en los horizontes de estudio realizarán los trayectos en avión.
- **La propuesta de ley entra en vigor.** En este supuesto, los pasajeros calculados en los horizontes de estudio no podrán realizar los trayectos en avión y se verán obligados a realizarlos en tren o en coche.

En el supuesto de que la propuesta de ley entre en vigor, resulta necesario estimar cuantos pasajeros, de los obtenidos en la fase 1, realizarían los trayectos en tren y cuantos en coche, de acuerdo con Statista [99], en 2019 realizaron la ruta Madrid-Barcelona en AVE (ruta con más tráfico de las 3), 4,3 millones de pasajeros, mientras que de acuerdo con la DGT [100], en 2019 realizaron la ruta Madrid-Barcelona en coche 16 millones de pasajeros. Lo que arroja una proporción 27 % AVE y 73 % coche.

Para poder comparar emisiones entre distintos modos de transporte es necesario poder homogeneizar los resultados obtenidos en la fase 2, lo cual se realizará con los resultados obtenidos en la fase 1.

En el caso del avión y del tren, se han obtenido las emisiones totales asociadas a la esperanza de vida de un vehículo para la fase de producción de combustible y la fase de operación, es decir, el número de operaciones totales realizadas a las rutas en cuestión, por lo que si se divide por el número total de operaciones realizadas, se obtienen las emisiones GEI de realizar una ruta promedio. En el caso del coche, las emisiones de estas dos fases hacen referencia a 150.000 km, por lo que si se divide por este valor y se multiplica por 527 km (distancia promedio de las 3 rutas en coches, ponderadas con el número de operaciones por ruta), se obtienen las emisiones asociadas a un trayecto y se presentan en la tabla 30.

Calculadas las emisiones por un trayecto promedio de las 3 rutas, se multiplica por el total de operaciones a realizar en cada medio de transporte, en el avión se obtienen en la fase 1, para el AVE se considera que cada AVE tiene 404 plazas [85] y se estima una ocupación del 80 %. En caso del coche, se estima que cada turismo que realiza el viaje irán 2 personas de media.

Por lo tanto, para homogeneizar los resultados, se multiplica las emisiones calculadas para un trayecto en cada modo de transporte, por el total de viajes necesarios y dividido por el total de pasajeros. Se presentan estos valores en la tabla 31.

Vehículo	Fase	2024	2030	2050
Avión	Construcción	17	16	15
	Combustible	1.542	868	-3.032
	Operación	7.308	5.846	5.846
	Total	8.867	6.730	2.829
AVE	Construcción	29	27	25
	Combustible	56	32	18
	Operación	0	0	0
	Total	85	59	43
Coche	Construcción	11	11	12
	Combustible	19	21	16
	Operación	67	54	29
	Total	96	87	58

**Tabla 30:** Emisiones del ciclo de vida completo por cada modo de transporte para realizar un trayecto promedio de las 3 rutas.

Vehículo	Unidad	2024	2030	2050
Avión	Pax.	2.786.579	3.373.986	5.012.350
	Ops.	22.387	27.106	40.268
AVE	Pax.	752.376	910.976	1.353.335
	Ops.	2.328	2.819	4.187
Coche	Pax.	2.034.203	2.463.010	3.659.016
	Ops.	1.017.101	1.231.505	1.829.508

**Tabla 31:** Pasajeros y operaciones consideradas por cada modo de transporte para la comparativa.

Por último, se presentan en la tabla 32 los valores de emisiones por pasajero, asociadas a cada modo de transporte.

Vehículo	Fase	2024	2030	2050
Avión	Construcción	0,14	0,13	0,12
	Combustible	12,39	6,98	-24,35
	Operación	58,71	46,97	46,97
	Total	71,24	54,07	22,73
AVE	Construcción	0,09	0,08	0,08
	Combustible	0,17	0,10	0,06
	Operación	0	0	0
	Total	0,26	0,18	0,13
Coche	Construcción	5,30	5,33	6,15
	Combustible	9,66	10,67	8,17
	Operación	33,26	27,14	14,58
	Total	48,22	43,34	28,90

**Tabla 32:** Emisiones del ciclo de vida completo por pasajero asociadas a cada modo de transporte.

## 2.4 Fase 4: propuestas

El objetivo de esta última fase es proponer acciones que ayuden a seguir mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero en función de si la propuesta de ley es beneficiosa o no, tras determinarse en la fase 3.

En caso de que la propuesta de ley sea beneficiosa, es decir, se reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero gracias a limitar los vuelos cortos con alternativa en tren, se propondrá aumentar el límite de 2,5 horas a 4 horas y se presentarán aquellas rutas que deberían ser también limitadas para seguir reducciones las emisiones de GEI a través de la propuesta de ley.

En caso de que la propuesta de ley no sea beneficiosa, es decir, las emisiones no se vean reducidas o la reducción sea prácticamente insignificativa, se presentarán las acciones que se están desarrollando en la industria aeronáutica para mitigar realmente las emisiones de GEI y se propondrá no llegar a implantar nunca la propuesta de ley, viendo que no es beneficiosa, desde el punto de vista ambiental.

### 3 Tráfico aéreo afectado

Se presentan ahora los resultados obtenidos de la fase 1 del estudio, es decir: las rutas aéreas afectadas, los pasajeros afectados, las operaciones afectadas y las aeronaves de referencia.

#### 3.1 Rutas aéreas afectadas

Tal y como se vio en el apartado anterior, las rutas afectadas por la propuesta de ley y por tanto, objeto de este estudio, son:

- Madrid-Alicante.
- Madrid-Valencia.
- Madrid-Barcelona.

Se observa que las tres rutas tienen como origen o destino la ciudad de Madrid, capital del país, lo cual es debido al diseño radial de la infraestructura ferroviaria, tal y como se observa en la figura 4. Por su parte, de las otras tres ciudades, dos de ellas son las siguientes con mayor población del país tras Madrid y por último, Alicante se sitúa en un núcleo turístico llamativo.

Dentro del apartado aéreo, se observa que las cuatro ciudades correspondientes a estas tres rutas, están entre las 8 ciudades españolas con mayor tráfico aéreo en 2023 [30]. De las otras cuatro ciudades, tres son islas, lo cual imposibilita su unión en tren y la otra es la ciudad de Málaga, la cual se sitúa a Madrid en 2 horas y 44 minutos, por ello no se puede seleccionar como ruta aérea afectada.

#### 3.2 Pasajeros afectados

A partir de la demanda esperada de pasajeros y seleccionando el escenario de crecimiento medio, se calculan los pasajeros totales anuales de las tres rutas para los horizontes de estudios, se presenta esta información en la figura 18.

Se observa como el total de pasajeros anuales de las tres rutas en 2024 será de 2.786.579, es decir, un 6,5% mayor que respecto al año 2023 y todavía muy por debajo del año récord, 2019 (3.212.998). Por su parte, en 2030 se espera alcanzar los 3.373.986 pasajeros anuales para las tres rutas, en este horizonte de estudio ya se superaría el año récord. Por último, en 2050 se proyecta superar la barrera de los 5 millones de pasajeros entre las tres rutas (5.012.350 pasajeros anuales).

Con estos datos de pasajeros totales en los horizontes de estudio, se podrá comparar mejor el impacto ambiental de los distintos modos de transporte, ya que estos serían los pasajeros afectados por la propuesta de ley y en lugar de realizar las rutas en aeronave, tendrían que verse obligados a utilizar otro modo de transporte.

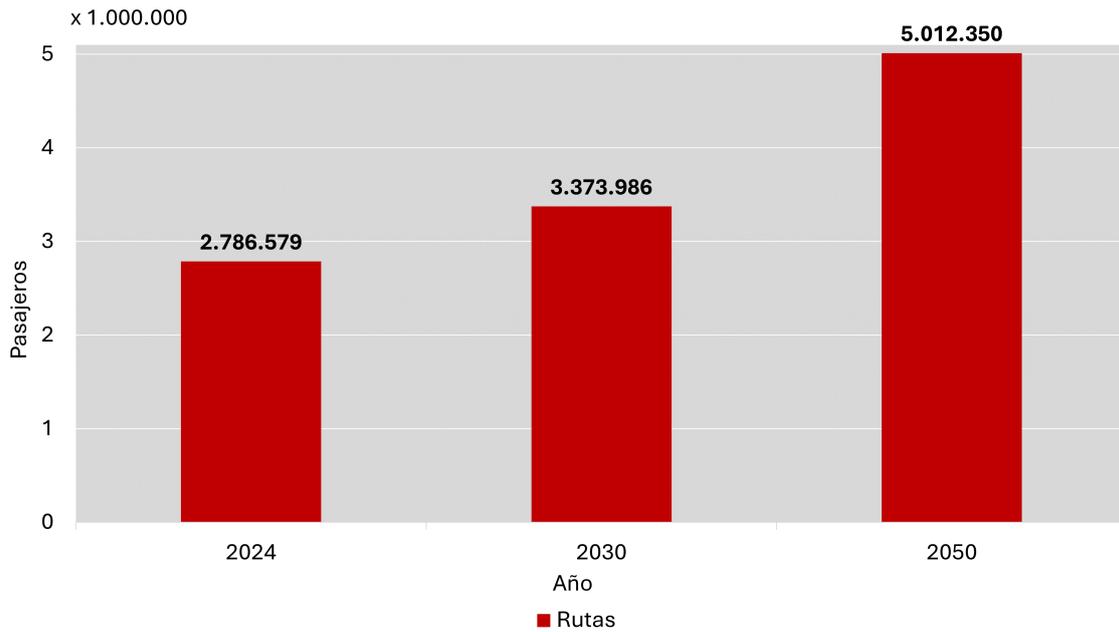


Figura 18: Número de pasajeros anuales de las tres rutas, en los horizontes de estudio.

### 3.3 Operaciones afectadas

Pasando al número de operaciones, es decir, el número de vuelos que se dejarían de realizar al entrar en vigor la propuesta de ley, se tiene la figura 19.

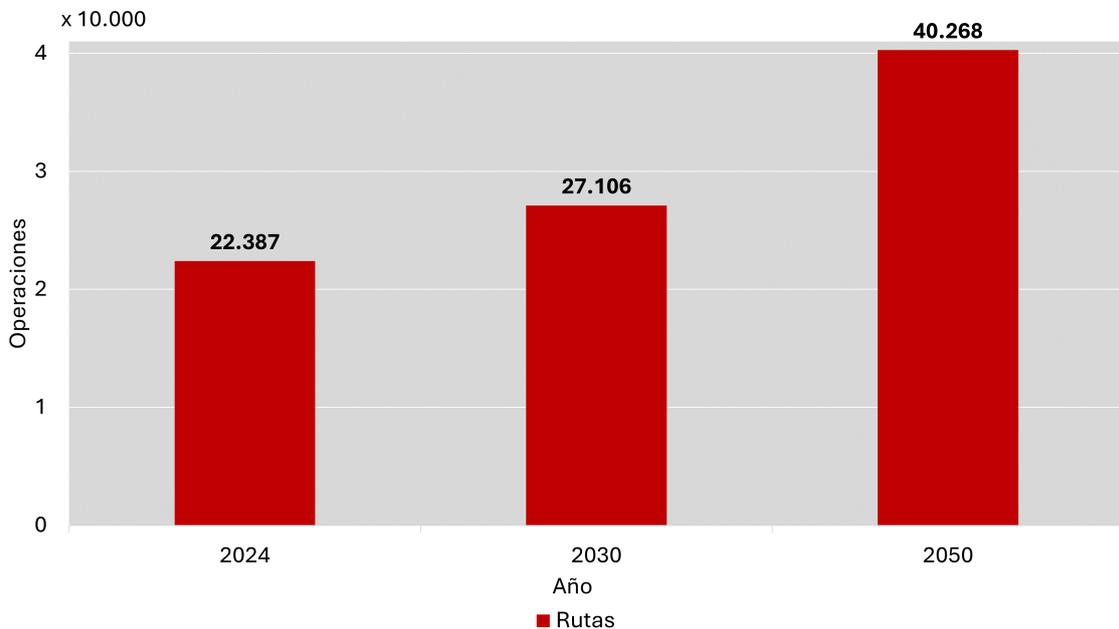


Figura 19: Número de operaciones anuales de las tres rutas, en los horizontes de estudio.

Si la propuesta de ley se hubiese implantado desde principio de año, en 2024 se dejarían de realizar 22.387 operaciones entre las tres rutas, es decir, un 6 % más que respecto al 2023. En 2030 se proyectan 27.106 operaciones totales, todavía por debajo del año

récord 2013 (28.408) y ya en 2050 se superaría la barrera de las 40.000 operaciones anuales gracias a las 40.268 operaciones esperadas.

Al igual que el número de pasajeros, el número de operaciones anuales totales ayudará a comparar el impacto ambiental de los distintos modos de transporte para realizar las tres rutas seleccionadas.

### 3.4 Aeronaves de referencia

Siguiendo la metodología, se presentan ahora las aeronaves de referencia para el análisis de ciclo de vida.

#### Airbus A320

Por un lado, en la figura 20 se presenta a la aeronave A320, aeronave elegida para el análisis del ciclo de vida de las rutas seleccionadas en el corto plazo (2024).



Figura 20: Airbus A320. Fuente: Airbus [80].

El Airbus A320 ha sido un pilar fundamental en la aviación comercial desde su introducción en 1988, reconocido por su eficiencia operativa, fiabilidad y versatilidad, permitiendo a las aerolíneas optimizar operaciones en rutas de corto y medio alcance. Su innovador sistema de control de vuelo fly-by-wire y su cabina de vidrio han marcado un hito en la tecnología aeronáutica, mejorando la seguridad y la experiencia de vuelo. [80]

#### Airbus A320 NEO

Por otro lado, en la figura 21 se presenta a la aeronave A320 NEO, aeronave elegida para el análisis del ciclo de vida de las rutas seleccionadas en el medio plazo (2030) y largo plazo (2050).



Figura 21: Airbus A320 NEO. Fuente: Airbus [81].

El Airbus A320 NEO (New Engine Option), introducido en 2016, combina la probada plataforma del A320 con innovaciones tecnológicas que mejoran la eficiencia y reducen el impacto ambiental. Equipado con motores Pratt & Whitney PW1100G-JM y dispositivos de punta de ala (sharklets), el A320 NEO consigue un 20 % menos de consumo de combustible que su versión anterior [81], reduciendo significativamente las emisiones de  $CO_2$ , además ofrece a las aerolíneas mayor flexibilidad operativa y menores costos. Su capacidad para vuelos más largos y eficientes ha mejorado las rutas posibles y la experiencia de los pasajeros, consolidándose rápidamente como un referente en la aviación comercial.

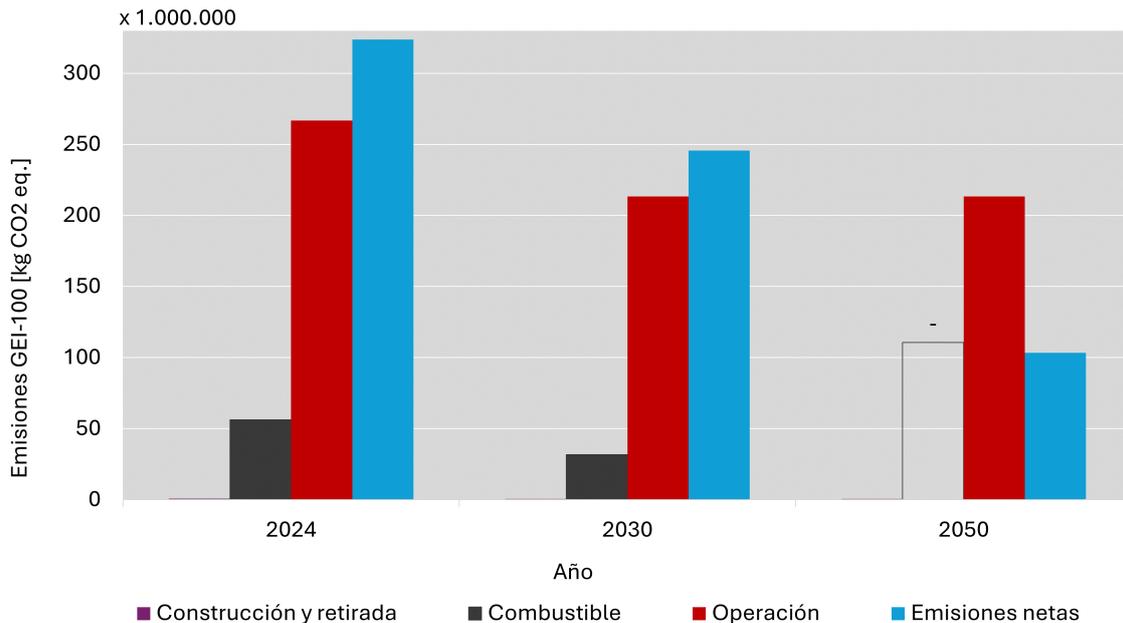
Para el A320 NEO, se considera la misma proporción de materiales que para el A320, ya que de acuerdo con Airbus [80, 81] los componentes de ambas versiones de aeronaves son muy similares.

## 4 Análisis del ciclo de vida

Se presentan ahora los resultados obtenidos de la fase 2 del estudio, es decir: el análisis del ciclo de vida de cada modo de transporte posible para las rutas: aviación, AVE y coche.

### 4.1 Resultado del LCA de la aeronave

Se presenta en la figura 22 el resultado del análisis del ciclo de vida de la aeronave en los tres horizontes de estudio.



**Figura 22:** Emisiones GEI-100 del ciclo de vida de una aeronave.

Del análisis de ciclo de vida realizado, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- La fase de construcción y retirada de la aeronave representa menos del 0,6 % en cada horizonte de estudio: 0,19 % en 2024, 0,23 % en 2030 y 0,53 % en 2050, motivo por el cual apenas se aprecia en la figura. En valor absoluto las emisiones asociadas a la fase de construcción y retirada están disminuyendo: 625.385 kg de  $CO_2$  eq. en 2024, 573.646 kg de  $CO_2$  eq. en 2030 y 544.140 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, esto se debe a que los procesos de fabricación asociados mejorarán ambientalmente en los horizontes de estudio.
- La fase de producción de combustible implicará cada vez menos emisiones de GEI (56.298.969 kg de  $CO_2$  eq. en 2024 y 31.694.344 kg de  $CO_2$  eq. en 2030), incluso en 2050 se obtiene un valor negativo (-110.650.517 kg de  $CO_2$  eq.), ya que se estarán mitigando emisiones. Aquí se aprecian los efectos beneficiosos del uso del SAF, puesto que en 2030 apenas sería del 6 %, mientras que en 2050 sería del 70 %. Gracias al SAF se reduce significativamente las emisiones netas.
- Por último, la fase de operación de la aeronave es claramente la que más contribuye a las emisiones de GEI, en 2024 se han estimado unas emisiones de 266.723.750 kg de  $CO_2$  eq., gracias a optimizaciones en el diseño del motor, en 2030 bajarían a 213.379.000 kg de  $CO_2$  eq., las cuales serían las mismas en 2050, ya que el uso del SAF no mejora las emisiones de GEI durante la combustión del motor.

## 4.2 Resultado del LCA del AVE

Se presenta en la figura 23 el resultado del análisis del ciclo de vida del AVE en los tres horizontes de estudio.

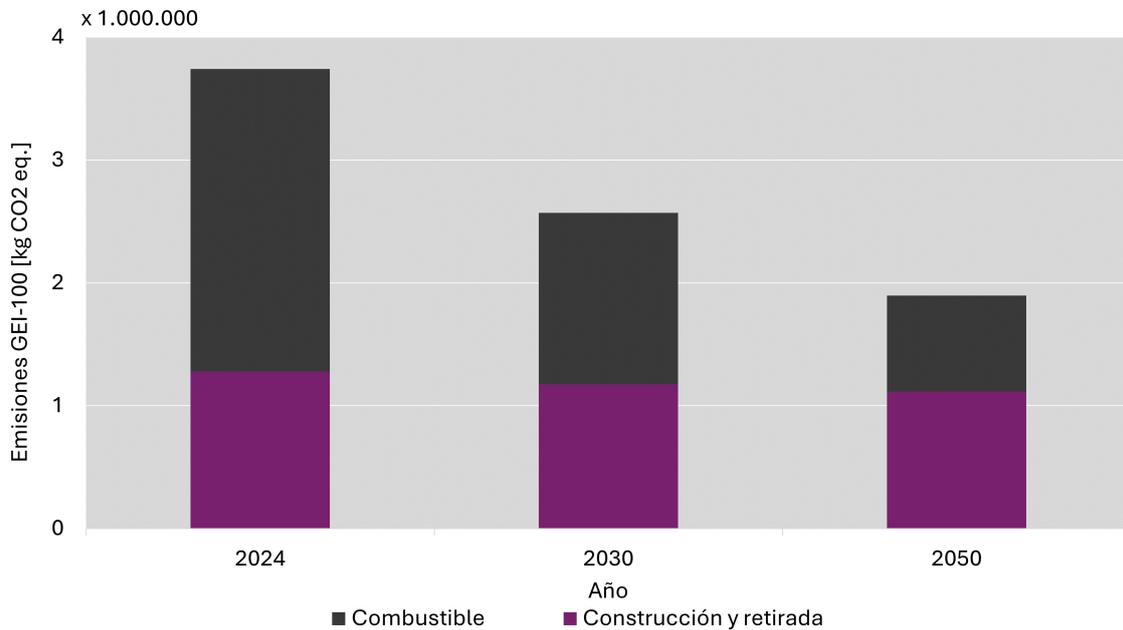


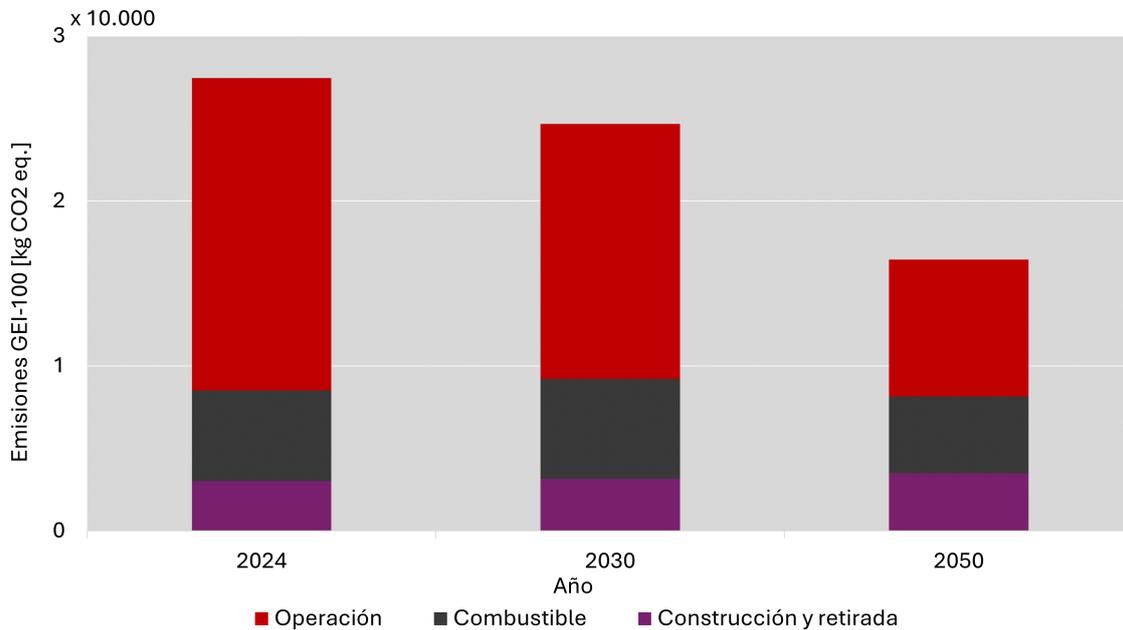
Figura 23: Emisiones GEI-100 del ciclo de vida de un AVE.

Del análisis de ciclo de vida realizado, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- La fase de construcción y retirada del tren de alta velocidad se puede considerar prácticamente constante en los tres horizontes de estudio, se estiman unas emisiones de GEI asociadas a estas fases de 1.278.569 kg de  $CO_2$  eq. en 2024, 1.174.982 kg de  $CO_2$  eq. en 2030 y 1.115.481 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, al igual que en la aeronave, esta reducción se debe a mejoras en los procesos de fabricación. Llama la atención que esta fase implica un 34,18 % en 2024, aumenta a 45,75 % en 2030 y ya es más de la mitad (58,86 %) en 2050, pese a la reducción de emisiones totales asociadas a estas fases, esto se debe a que el resto de fases tiene mayores reducciones, como se comenta en los siguientes puntos.
- En cuanto al proceso de producción de electricidad, se observa una gran disminución de las emisiones asociadas a esta fase, pasando de 2.461.792 kg de  $CO_2$  eq. en 2024, 1.393.391 kg de  $CO_2$  eq. en 2030 y 779.791 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, esto indica una gran mejoría en cuanto a los procesos de distribución de la energía y a las fuentes de energía esperadas (menos contaminantes).
- Cabe destacar que la fase de operación es cero en todos los horizontes de estudio, ya que el AVE es 100 % eléctrico, no produciéndose emisiones durante su fase de operación.

### 4.3 Resultado del LCA del coche

Se presenta en la figura 24 el resultado del análisis del ciclo de vida del coche en los tres horizontes de estudio.



**Figura 24:** Emisiones GEI-100 del ciclo de vida de un coche. *Fuente: J.M. Desantes, et al. [87].*

Del análisis de ciclo de vida realizado, se pueden destacar los siguientes aspectos:

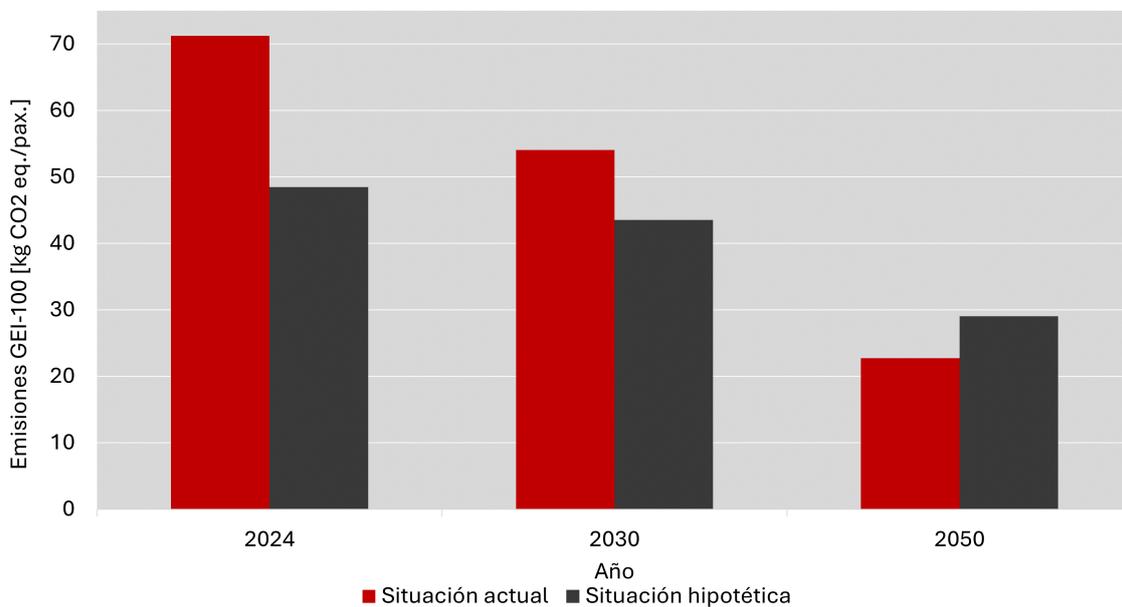
- La fase de construcción y retirada del vehículo de carretera es la que menos emisiones de GEI asociadas implica, aunque es la única que aumenta en cada horizonte de estudio: 3.015 kg de  $CO_2$  eq. en 2024, 3.150 kg de  $CO_2$  eq. en 2030 y 3.500 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, esto se debe a que la construcción de un vehículo eléctrico tiene mayores emisiones asociadas a la fase de construcción debido al mayor peso del mismo y a la fase de retirada por las baterías.
- En cuanto al proceso de producción de combustible, llama la atención que debido a la mezcla de tecnologías considerada, en 2024 se tienen unas emisiones asociadas de 5.500 kg de  $CO_2$  eq. y en 2030 de 6.073 kg de  $CO_2$  eq., ya en 2050 sí se alcanza una reducción con respecto al presente con unas emisiones de 4.650 kg de  $CO_2$  eq.
- Se observa que la gran reducción de emisiones de GEI se produce en la fase de operación del vehículo, pasando de 18.935 kg de  $CO_2$  eq. en 2024, 15.450 kg de  $CO_2$  eq. en 2030 y 8.300 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, esto se debe al aumento del uso del vehículo eléctrico, el cual no tiene emisiones asociadas en la fase de operación.

## 5 Análisis comparativo de las emisiones de GEI

Se presentan ahora los resultados obtenidos de la fase 3 del estudio, es decir, el análisis comparativo de las emisiones en dos contextos diferenciados:

- **Situación actual**, sin propuesta de ley; por lo que todos los pasajeros calculados en la fase 1, seguirían realizando los viajes en avión.
- **Situación hipotética**, entrada en vigor de la propuesta de ley; se verían limitadas las tres rutas seleccionadas en la fase 1 y todos los pasajeros proyectados tendrían que realizar las rutas en otros modos de transporte diferentes al avión. Tal y como se presentó en la metodología, se estima un 27 % en AVE y un 73 % en coche.

Se presenta en la figura 25 el resultado de la comparativa, con las dos situaciones explicadas anteriormente.



**Figura 25:** Comparativa de las emisiones GEI-100 por pasajero.

De este análisis comparativo, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Considerando que nunca llegase a entrar en vigor la propuesta de ley, se observa que en 2024, las emisiones medias de gases de efecto invernadero por realizar estas rutas en avión serían de 71,24 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero, en 2030 bajarían a un total de 54,07 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero (-23,53 % con respecto a 2024), principalmente gracias a mejoras en el diseño de las aeronaves y motores más eficientes. Por último, en 2050 las emisiones bajarían a 22,73 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero, gracias al uso del SAF, que tal y como se ha definido en la metodología, se ha considerado un 70 % de uso de SAF.
- Por otro lado, considerando que la propuesta de ley hubiese entrado en vigor desde el 01 de enero de 2024, la situación hipotética hubiese generado 48,48 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero en 2024; 43,52 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero en 2030, principalmente gracias a procesos más eficientes en la distribución de la energía eléctrica y al mix

energético considerado y por último, en 2050, se tienen unas emisiones de 29,03 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero, además de las mejoras comentadas para 2030, esta reducción se debe principalmente al mayor uso de coches eléctricos.

- Todos los modos de transporte aportan reducciones a las emisiones de GEI, se observa que en el caso del avión, operando estas 3 rutas, en 2030 se conseguirá una reducción del 23,53 % con respecto al 2024 y una reducción del 61,46 % en 2050 con respecto al 2024.
- Por su parte, si entrase en vigor la propuesta de ley, en 2030 se conseguiría una reducción del 10,23 % de emisiones de GEI con respecto al 2024 y un 40,12 % en 2050 con respecto al 2024.
- Si la comparativa se centra en el 2024 (corto plazo), se puede observar que la propuesta de ley es beneficiosa en el año actual, ya que se tendría una reducción media de 22,75 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero, es decir, una reducción del 32 %. Es lógico que a corto plazo la propuesta de ley sea beneficiosa, ya que la industria aeronáutica está desarrollando propuestas y alternativas para reducir las emisiones, pero éstas conllevan tiempo para su ejecución. Se plantea si existe alguna alternativa a corto plazo que permita reducir las emisiones de GEI en el sector aéreo, esto será evaluado en el apartado 6.
- Centrándose la comparativa en el año 2030 (medio plazo), se observa una reducción de 10,54 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero, es decir, una reducción del 20 %, la propuesta de ley seguiría siendo beneficiosa en el medio plazo, aunque se empieza a entrever que el sector aéreo tiene mayor potencial en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, gracias al uso del SAF.
- Por último, en 2050 (largo plazo), ya no se tendría una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero en caso de entrar en vigor la propuesta de ley, sino un aumento en las emisiones de 6,30 kg de  $CO_2$  eq. por pasajero, lo que implicaría un aumento del 28 %.
- Se destaca que no se han considerado mejoras en el diseño de las aeronaves ni la introducción de motores más eficientes, más allá del 2024 al 2030 con el Airbus A320 NEO, el cual ya está en funcionamiento, estos factores se escapan del límite de este estudio. Al analizar la tendencia en la eficiencia del combustible para nuevos aviones comerciales de 1960 a 2014 [101], se concluye que es innegable que también habrá mejoras en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero gracias a la mejora de la eficiencia en el uso del combustible gracias a mejores diseños de motores.
- Tras comparar los resultados obtenidos en la fase 3, se observa que la aplicación de la propuesta de ley tendría efectos positivos a corto y medio plazo, pero efectos negativos a largo plazo. Sería conveniente realizar un análisis económico para cuantificar el impacto en los puestos de trabajo que esto supondría. En cualquier caso, la eliminación de rutas aéreas a corto plazo, para su posterior reinstauración a largo plazo, podría suponer un problema. Por lo tanto, dado el potencial a largo plazo en la reducción de emisiones del sector aéreo, sería más beneficioso incentivar el uso de SAF en un horizonte a corto plazo.

## 6 Propuestas del estudio

Tras recomendar en la comparativa que no se implemente la propuesta de ley, se presentarán y evaluarán acciones en desarrollo dentro de la industria aeronáutica para mitigar las emisiones de GEI del transporte aéreo sin limitar rutas.

### 6.1 Aumento del uso del SAF

Tal y como se ha visto en la fase 2, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector aéreo vendrá del uso de SAF. Por lo tanto, se propone que, en lugar de legislar para limitar rutas, el gobierno debería apoyar el desarrollo de la producción de SAF y obligar a un uso mínimo del mismo.

El SAF se produce a partir de biomasa, como residuos agrícolas, desechos forestales o cultivos específicos para bioenergía. Estas materias primas tienen la capacidad de capturar  $CO_2$  durante su crecimiento, contribuyendo a una reducción neta de las emisiones, ya que el  $CO_2$  absorbido por las plantas durante la fotosíntesis compensa parcialmente el  $CO_2$  emitido durante la combustión [98].

#### Limitaciones del uso del SAF

El uso del SAF se enfrenta actualmente a la limitación de su ritmo de producción. A pesar de un aumento en los últimos años, en 2023 el SAF representó solo el 0,53 % del combustible total consumido por la aviación. Además, las políticas gubernamentales actuales no son suficientemente robustas para incentivar masivamente su producción y uso. Es necesario un mayor apoyo y prioridad política para escalar la producción de SAF y hacerlo más competitivo frente a los combustibles fósiles. [102]

#### Ventajas del uso de SAF

Las materias primas consideradas para la producción de SAF (desechos forestales y cultivos específicos), tienen la capacidad de capturar  $CO_2$  durante su crecimiento, ayudando a reducir las emisiones netas.

Si se superaran las limitaciones en la producción y se aumentara el uso de SAF al 37 % en 2024 y al 28 % en 2030 (menor debido a la eficiencia del modelo de aeronave), se obtendrían las mismas emisiones que con la propuesta de ley. Esto compensaría los efectos de la propuesta de ley a corto y medio plazo.

A largo plazo, el objetivo del 70 % de SAF proporcionaría mayores beneficios que la propuesta de ley, tal y como se ha visto en el capítulo anterior, lo cual permitiría unas reducciones del 60 % en emisiones de gases de efecto invernadero, con respecto a no utilizar nada de SAF en 2050.

## 6.2 Desarrollo de la propulsión por hidrógeno

El uso de hidrógeno como combustible en la aviación es una alternativa prometedora para reducir las emisiones de GEI, empleando dos tecnologías principales: la combustión directa de hidrógeno en turbinas y el uso de celdas de combustible para generar electricidad que impulsa motores eléctricos. [103]

Empresas como ZeroAvia y proyectos como Heaven están trabajando en la modificación de aeronaves para ser impulsadas por hidrógeno y en el desarrollo de tanques de hidrógeno líquido. Estos proyectos son esenciales para avanzar en la tecnología y demostrar su viabilidad. [103]

### Limitaciones del uso del hidrógeno

A pesar de sus ventajas, el hidrógeno presenta algunas limitaciones que deben superarse: [103]

- Producción y suministro. Crear y operar la infraestructura necesaria para producir, licuar y dispensar hidrógeno es un desafío tanto en los primeros años de implementación como a largo plazo. Esto incluye el establecimiento de una cadena de suministro de hidrógeno líquido a gran escala y la adaptación de la infraestructura aeroportuaria.
- Almacenamiento. El hidrógeno tiene una densidad volumétrica más baja en comparación con el queroseno, lo que requiere tanques más grandes y un rediseño significativo de las aeronaves. Los tanques de hidrógeno deben ser voluminosos para almacenar el combustible a bordo, lo que es un desafío para vuelos de largo alcance debido al tamaño y peso de los tanques.
- Aunque se están probando sistemas de celdas de combustible como unidades de potencia auxiliares y se han desarrollado prototipos de aeronaves impulsadas por hidrógeno, estas tecnologías aún no se han implementado en producción en serie.

### Ventajas del uso de hidrógeno

El hidrógeno ofrece múltiples ventajas como combustible para la aviación: [103]

- La combustión de hidrógeno en vuelo elimina las emisiones de  $CO_2$ . Se proyecta que la combustión de hidrógeno podría reducir el impacto climático en vuelo entre un 50 % y un 75 %, mientras que las celdas de combustible podrían lograr una reducción del 75 % al 90 %.
- El hidrógeno puede ser producido a partir de energía renovable, lo que ofrece una fuente de combustible que no emite  $CO_2$  durante su producción. Esto es una ventaja significativa frente a los combustibles fósiles y sintéticos que dependen de fuentes de carbono.
- El hidrógeno tiene una densidad de energía gravimétrica tres veces mayor que la del queroseno, lo que permite reducir el peso total del combustible necesario para los vuelos, aunque requiere tanques más grandes para almacenamiento.
- Los estudios iniciales muestran que las emisiones de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) pueden ser reducidas en un 50 % a 80 % mediante la tecnología de mezcla pobre, sin grandes reducciones en la eficiencia. Esto es importante porque el  $NO_x$  contribuye al calentamiento global al mejorar el ozono en la atmósfera.

### 6.3 Optimización de rutas - SESAR

El proyecto SESAR (Single European Sky ATM Research) se centra en la optimización de las rutas de vuelo y tiene un impacto significativo en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en la aviación.

SESAR está implementando tecnologías avanzadas de gestión del tráfico aéreo (ATM) para mejorar la eficiencia de las rutas de vuelo. Esto incluye la optimización de trayectorias y la mejora de la previsión meteorológica, lo que permite vuelos más directos y eficientes.

El proyecto fomenta la colaboración entre diferentes países y regiones dentro de Europa, lo cual es crucial para la integración y la coordinación del espacio aéreo, evitando congestiones y reduciendo el tiempo de vuelo.

#### Limitaciones del proyecto SESAR

A pesar de sus avances, el proyecto enfrenta varias limitaciones que han impedido su implementación completa: [104]

- La coordinación y cooperación entre una amplia gama de actores, incluyendo entidades públicas y privadas, civiles y militares, es un desafío significativo. La implementación requiere sincronización de múltiples sistemas y procedimientos en toda Europa, lo cual es complejo y demanda tiempo.
- La modernización de la infraestructura ATM (Air Traffic Management) requiere inversiones sustanciales. A pesar de los fondos asignados, la magnitud del proyecto implica una necesidad continua de recursos financieros que puede ser difícil de asegurar y distribuir equitativamente.
- SESAR se basa en el desarrollo y la validación de soluciones tecnológicas innovadoras que aún están en diferentes fases de investigación y desarrollo, como por ejemplo la integración de nuevas tecnologías para aumentar la automatización y la ciberseguridad, aspectos que requieren tiempo y pruebas extensivas antes de su implementación.
- La implementación de SESAR implica cambios significativos en las normativas y regulaciones de aviación a nivel europeo. Esto requiere la aprobación y adaptación de leyes en múltiples países, un proceso que puede ser lento y sujeto a negociaciones políticas complejas.

#### Ventajas del proyecto SESAR

Al optimizar las rutas de vuelo, los aviones pueden volar distancias más cortas y evitar áreas de congestión, lo que resulta en un menor consumo de combustible. Menor consumo de combustible se traduce directamente en menores emisiones de  $CO_2$ .

SESAR estima que sus iniciativas podrían ahorrar hasta 500 kg de combustible por vuelo, lo que se traduce en una reducción de aproximadamente 1,6 toneladas de  $CO_2$  por vuelo.

La meta a largo plazo del proyecto es lograr una reducción de emisiones del 10 % al 20 % en el tráfico aéreo europeo para 2035, lo cual representaría un impacto significativo en la lucha contra el cambio climático. [105]

## 6.4 Supresión del tankering

El tankering es una práctica operativa en la aviación en la que los aviones cargan más combustible del necesario para un vuelo específico con el objetivo de evitar repostar en aeropuertos donde el combustible es más caro. Esto se hace a menudo en rutas en las que hay una diferencia significativa en el precio del combustible entre el aeropuerto de origen y el de destino. [106]

### Limitaciones de la supresión del tankering

Las principales limitaciones de suprimir el tankering son: [106, 107]

- Diferencias en el precio del combustible. Las variaciones significativas en los precios del combustible entre aeropuertos incentivan a las aerolíneas a continuar con la práctica para reducir costos operativos.
- Costos de implementación. Modificar las operaciones para eliminar el tankering puede implicar inversiones en nuevas tecnologías y procedimientos, así como en la formación del personal.
- Riesgos operativos. Situaciones como fallos técnicos, interrupciones sociales, y escasez de combustible en aeropuertos destino pueden justificar el uso de tankering para asegurar operaciones continuas y evitar retrasos.
- Políticas de precios de  $CO_2$ . Aumentar los costos asociados con las emisiones de  $CO_2$  podría disuadir el tankering, pero actualmente muchas asignaciones de emisiones son gratuitas o tienen costos bajos.
- Limitaciones de alcance. Algunos aviones pueden necesitar realizar tankering para vuelos de larga distancia donde el repostaje en el destino no es viable.

### Ventajas de la supresión del tankering

La supresión del tankering podría reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero por varias razones: [106]

- Reducción del peso del avión. El combustible adicional aumenta el peso del avión, lo que a su vez incrementa el consumo de combustible durante el vuelo. Al eliminar el tankering, el avión volará con menos peso y, por lo tanto, utilizará menos combustible y emitirá menos  $CO_2$ .
- Eficiencia operativa. Volar con una carga de combustible óptima para cada segmento del vuelo mejora la eficiencia operativa del avión, reduciendo el consumo innecesario de combustible.
- Impacto acumulativo. Dado que la aviación es un sector con un alto volumen de vuelos diarios, la reducción de incluso pequeñas cantidades de combustible por vuelo puede tener un impacto significativo en la reducción total de emisiones de GEI.

Los estudios han mostrado que la eliminación del tankering podría llevar a una reducción notable en las emisiones de  $CO_2$ . Según la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), la práctica del tankering puede incrementar el consumo de combustible hasta en un 5%. Eliminando esta práctica, la reducción de emisiones podría ser significativa, dependiendo de la cantidad de vuelos y las rutas específicas involucradas. [107]

## 6.5 Comparativa e implementación de las propuestas

Tras haberse presentado cuatro propuestas que ayudarían a reducir las emisiones de GEI, se procede a ordenarlas de acuerdo con su mayor beneficio potencial:

- **Propulsión por hidrógeno.** Como se ha visto anteriormente, la combustión de hidrógeno podría reducir el impacto climático en vuelo entre un 50 % y un 75 %, mientras que las celdas de combustible podrían lograr una reducción del 75 % al 90 %. Es innegable que poder aplicar la propulsión por hidrógeno a vuelos de corto y largo radio es, a día de hoy, todo un desafío, siendo esta la alternativa más difícil de implementar debido a sus limitaciones. [103]
- **Aumento del uso del SAF.** El beneficio del uso del SAF depende del % de SAF utilizado por vuelo, considerando a largo plazo un 70 % de SAF en los vuelos de corto y largo radio, los beneficios serían en torno a un 60-80 % de reducción de emisiones. Actualmente el SAF ya supone un 0,53 % del combustible total utilizado, siendo su ritmo de producción una limitación más asequible de vencer, que respecto a la propulsión por hidrógeno. [102, 108]
- **Optimización de rutas - SESAR.** Se espera para 2035 una reducción de emisiones del 10-20 % gracias a los beneficios del proyecto SESAR, en cuanto a sus limitaciones, implica también la coordinación de diversos actores y países, además de grandes inversiones [104, 105], se podría considerar que estas limitaciones son considerablemente menores que la propulsión por hidrógeno y algo menores que respecto al aumento del SAF.
- **Supresión del tankering.** Si se consiguiese eliminar esta práctica operativa, el beneficio sería una reducción de las emisiones en torno a un 5 %, considerando las limitaciones comentadas (diferencia del precio del combustible principalmente y cierta inversión), la supresión del tankering sería la propuesta menos limitada para su implementación, de las cuatro analizadas.

Es importante destacar que las propuestas presentadas no son incompatibles entre ellas, salvo el aumento del uso del SAF y el desarrollo de la propulsión por hidrógeno, puesto que ambas son tecnologías de propulsión. A largo plazo, por ejemplo, se podrán tener los beneficios simultáneos del aumento del uso del SAF, del proyecto SESAR y de la supresión del tankering. Es llamativo que a mayores limitaciones en una propuesta, mayores son sus beneficios, en cuanto a reducción de emisiones.

Por último, se recomienda un enfoque escalonado a la hora de integrar estas propuestas, para minimizar las emisiones del transporte aéreo. A corto plazo se debe priorizar el aumento del uso de SAF mediante incentivos gubernamentales y políticas que obliguen a un uso mínimo e ir aumentando progresivamente cada año, también se puede marcar como objetivo la supresión del tankering. Simultáneamente, se debe avanzar en la infraestructura y prototipos para la propulsión por hidrógeno, así como optimizar las rutas de vuelo con el proyecto SESAR.

A medio plazo, el objetivo debería ser incrementar el uso de SAF hasta el 30 % del total del combustible utilizado, mientras se implementan aeronaves comerciales con celdas de combustible de hidrógeno en rutas cortas y se implanta el proyecto SESAR. A largo plazo (2050), se debe alcanzar un uso del 70 % de SAF y consolidar la propulsión por hidrógeno en vuelos de mayor distancia.

A corto plazo no se puede igualar los beneficios de la propuesta de ley, pero si se debe acortar la diferencia año a año y asegurar mayores beneficios a partir del medio plazo.

## 7 Conclusiones y trabajos futuros

En esta apartado se presentan las conclusiones derivadas del análisis realizado en este Trabajo de Fin de Máster y se proponen posibles líneas de investigación futuras que ayuden a ampliar el trabajo.

### 7.1 Conclusiones del TFM

Las conclusiones de este TFM buscan responder a los objetivos planteados en la introducción, por lo que, respondiendo al objetivo principal, se destaca la siguiente conclusión:

- En cuanto a evaluar la efectividad de la propuesta de ley en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la limitación de vuelos cortos, se puede concluir que el la propuesta de ley, considerando el análisis de ciclo de vida planteado, es beneficiosa a corto y medio plazo, puesto que se consiguen unas reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero del 32 % (2024) y 20 % (2030). Por otro lado, a largo plazo ya no sería beneficiosa, puesto que implicaría un aumento en las emisiones del 28 % en 2050.

Respondiendo a los objetivos secundarios, se presentan las siguientes conclusiones:

- En relación con evaluar las rutas que se verían limitadas por la ley propuesta, estimar el número de pasajeros y operaciones en distintos horizontes temporales y definir las aeronaves representativas, se puede concluir:
  - Las rutas Madrid-Alicante, Madrid-Valencia y Madrid-Barcelona fueron identificadas como las afectadas por la propuesta de ley debido a la infraestructura ferroviaria radial. El tráfico aéreo en estas rutas es significativo, considerando la importancia de las ciudades que conectan.
  - Se espera que el número de pasajeros anuales en estas rutas aumente considerablemente, alcanzando más de 5 millones para 2050, por los 2,7 millones de 2024. La ley afectaría directamente a estos pasajeros, quienes tendrían que optar por alternativas de transporte como el tren de alta velocidad o sus vehículos propios.
  - El número de operaciones también variaría de forma significativa, pasando de más de 22.000 en 2024 a más de 40.000 en 2050. Este sería el volumen anual de operaciones aérea que dejarían de realizarse en caso de entrar en vigor la propuesta de ley.
  - Por último, las aeronaves representativas son el A320 para el corto plazo, puesto que ha sido la aeronave más empleada en estas rutas en los últimos años; a medio plazo se ha elegido el A320 NEO, debido a que desde su entrada en funcionamiento en España, se ha destacado como la aeronave con mayor crecimiento anual en cuanto a operaciones. A largo plazo también se ha elegido el A320 NEO, ya que, aunque se es consciente de que la aeronave de referencia para estas rutas en 2050 será un modelo nuevo aún por desarrollar, no se puede realizar un análisis de ciclo de vida si no se dispone de la suficiente información relevante (materiales, consumo, etc).
- Respondiendo a realizar un análisis exhaustivo del ciclo de vida del transporte aéreo, ferroviario y por carretera, para calcular sus emisiones totales y evaluar su impacto ambiental. Se puede concluir:

- El avión destaca, de forma negativa, como el medio de transporte que más emisiones genera en la fase de operación. La reducción de emisiones en esta fase proviene del cambio de modelo de aeronave, por ello, en 2050 no habrá mejoras en la fase de operación; la fase de construcción y retirada de la aeronave supone menos de un 0,6 % de las emisiones netas totales. Por último, la fase de producción de combustible será la que conseguirá mitigar parte de las emisiones, gracias al uso del SAF. Las emisiones netas disminuirán de más de 300 millones de kg de  $CO_2$  eq. en 2024 a algo más de 100 millones de  $CO_2$  eq. en 2050.
  - El AVE se destaca como la opción más sostenible debido a sus nulas emisiones durante la fase de operación. En cuanto a la fase de producción de electricidad, se van a conseguir grandes mejoras, puesto que se pasaran de unas emisiones totales de 2.461.792 kg de  $CO_2$  eq. en 2024 a 779.791 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, la fase de construcción y retirada permanecerá casi constante en el tiempo: 1.278.569 kg de  $CO_2$  eq. en 2024 a 1.115.481 kg de  $CO_2$  eq. en 2050.
  - El coche se destaca como el vehículo que menos emisiones emite por unidad de vehículo, debido a su peso y capacidad muy inferiores en comparación a un tren o avión. El aumento esperado de los coches eléctricos ayudará a que las emisiones, de la fase de operación, disminuyan a más de la mitad: 18.935 kg de  $CO_2$  eq. en 2024 a 8.300 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, aunque se verá penalizada levemente la fase de construcción y retirada del vehículo: 3.015 kg de  $CO_2$  eq. en 2024 por 3.500 kg de  $CO_2$  eq. en 2050, principalmente debido al mayor peso del vehículo eléctrico y el uso de baterías.
- Calculando las emisiones por pasajero de la situación con y sin propuesta de ley, se puede concluir que el transporte por carretera y en avión, son los modos de transporte que más emisiones emiten en 2024. La electrificación de los coches y el uso de SAF en la aviación, son las medidas que ayudarán a que el sector transporte disminuya sus emisiones de forma conjunta. Debido a la capacidad de un coche, hace que el transporte por carretera aumente el número de vehículos necesarios para mover un mismo número de pasajeros, esto limitará los beneficios de la propuesta de ley, haciendo incluso que no sea beneficiosa a largo plazo.
  - Por último, considerando las propuestas presentadas en este trabajo, se concluye que la industria aérea dispone de diversos medios para disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero, además, los beneficios obtenidos de la mayoría de las propuestas son acumulativos entre ellas. Se destaca que las medidas necesitan no solo de grandes inversiones por parte del sector aéreo, sino también de alianzas para lograr los objetivos y del apoyo de los distintos gobiernos.

## 7.2 Trabajos futuros

Este TFM ha presentado un análisis medioambiental profundo y cuantitativo en el contexto de la propuesta de ley, lo que ha permitido responder al debate sobre la conveniencia de dicha propuesta desde una perspectiva medioambiental. Aun así, se pueden llevar a cabo una serie de nuevos estudios para complementar los resultados presentados.

- **Análisis del ciclo de vida para aeronaves con combustible sostenible.** Realizar un análisis del ciclo de vida para aeronaves utilizando combustible 100 % sostenible o incluso hidrógeno líquido permitiría evaluar de manera más precisa el impacto ambiental total y las posibles reducciones de emisiones de GEI en comparación con los combustibles tradicionales. Este estudio también podría identificar los desafíos tecnológicos y económicos asociados con la transición a combustibles más sostenibles, proporcionando una base sólida para futuras políticas y desarrollos en la aviación sostenible.
- **Análisis de impacto económico.** Es crucial comprender las mayores implicaciones económicas de la propuesta de ley. Este estudio debería evaluar el impacto económico de la reducción de vuelos cortos en la industria aeronáutica y su cadena de suministro, incluyendo la producción, mantenimiento y operaciones de aeronaves. Además, sería importante considerar los efectos sobre el empleo en el sector aéreo, así como en los aeropuertos y las empresas auxiliares. Analizar cómo estas reducciones afectarían a los ingresos de las aerolíneas y las posibles reestructuraciones necesarias para adaptarse a un nuevo modelo de negocio proporcionaría una visión integral de las consecuencias financieras y ayudaría a desarrollar estrategias para mitigar cualquier efecto negativo en la industria, promoviendo al mismo tiempo una transición sostenible.
- **Análisis de otras emisiones contaminantes.** Aunque estudiar solo el impacto ambiental de los GEI está más que justificado, se podrían considerar otras emisiones contaminantes. Incluir en futuros estudios el análisis de otros contaminantes, como  $NO_x$  y partículas, proporcionaría una evaluación más completa del impacto ambiental. Esto permitiría obtener una visión más completa de las repercusiones de las diferentes tecnologías de transporte, identificando tanto beneficios como posibles desafíos adicionales. Además, esta ampliación del análisis podría informar mejor las decisiones políticas, promoviendo medidas que aborden una gama más amplia de impactos ambientales y mejoren la calidad del aire en general.
- **Desarrollo de un modelo de aeronave para 2050.** Investigar un modelo de aeronave a desarrollar para 2050 y considerarlo en el análisis de ciclo de vida proyectado para esa fecha es crucial. Esta aeronave incorporaría mejoras significativas en su rendimiento, incluyendo la optimización aerodinámica, materiales más ligeros y motores avanzados que reducirían considerablemente el consumo de combustible. Evaluar las posibles tecnologías de propulsión alternativas, como el uso de hidrógeno líquido o baterías eléctricas de alta capacidad, maximizaría la sostenibilidad ambiental. Este estudio ofrecería una perspectiva a largo plazo sobre la evolución de la aviación sostenible y ayudaría a guiar las inversiones y las políticas futuras en el sector aeroespacial.
- **Incluir el autobús como opción de transporte por carretera.** Incluir el autobús como opción de vehículo en el transporte por carretera es importante. Aunque puede ser menos cómodo que otros modos de transporte, el autobús ofrece la ventaja de reducir significativamente las emisiones en comparación con los vehículos individuales. Esto se debe a su capacidad para transportar a un mayor número de pasajeros de manera más eficiente, reduciendo las emisiones por pasajero y contribuyendo a un menor impacto ambiental.

## A Número de operaciones y pasajeros

Se presenta en este anexo los datos de operaciones y pasajeros obtenidos de la web de Aena [73], para el periodo 2014-2023 y que han servido como datos de partida en el apartado 3.

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-23	317	1.153	380	28.519	169.938	30.893
Nov-23	310	1.216	369	27.401	170.911	29.146
Oct-23	341	1.208	389	28.939	180.138	32.759
Sep-23	326	1.018	386	29.240	156.249	32.577
Ago-23	330	725	357	32.352	124.505	31.458
Jul-23	330	994	386	27.973	154.333	31.736
Jun-23	256	1.088	311	17.888	163.219	26.465
May-23	330	1.261	365	23.315	182.796	29.086
Abr-23	315	1.137	342	21.948	167.925	28.713
Mar-23	303	1.173	340	28.520	171.693	28.868
Feb-23	280	1.053	330	28.661	148.313	26.355
Ene-23	301	1.049	353	30.510	143.996	28.677

**Tabla 33:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2023.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-22	284	1.005	346	28.338	143.068	27.424
Nov-22	315	1.101	354	29.595	159.804	28.182
Oct-22	321	1.184	353	26.268	178.891	28.371
Sep-22	299	1.093	368	25.485	161.345	29.835
Ago-22	310	793	353	26.662	126.170	29.797
Jul-22	307	953	379	24.241	152.241	29.480
Jun-22	328	978	347	23.643	151.462	25.607
May-22	332	1.110	353	21.894	158.449	23.987
Abr-22	315	1.029	354	20.451	142.989	22.382
Mar-22	299	1.002	367	19.088	131.165	22.591
Feb-22	271	824	318	17.340	110.298	20.312
Ene-22	293	870	344	17.299	100.541	20.829

**Tabla 34:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2022.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-21	270	924	344	15.877	120.460	19.923
Nov-21	261	937	319	17.174	128.265	19.618
Oct-21	281	992	331	17.502	135.761	20.996
Sep-21	264	915	309	15.984	116.485	19.886
Ago-21	268	682	327	16.383	84.784	19.540
Jul-21	249	772	317	13.751	88.308	17.249
Jun-21	187	743	253	9.657	73.516	13.255
May-21	185	677	258	9.567	62.004	12.915
Abr-21	183	590	227	7.367	54.753	10.915
Mar-21	139	558	233	7.861	57.846	12.235
Feb-21	115	497	213	6.677	46.896	10.463
Ene-21	118	534	227	6.444	45.802	9.101

**Tabla 35:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2021.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-20	126	617	235	6.693	53.436	10.187
Nov-20	120	512	210	6.729	37.295	9.500
Oct-20	135	474	220	6.667	35.532	9.852
Sep-20	176	459	248	8.348	46.846	10.643
Ago-20	135	451	191	8.327	41.257	7.134
Jul-20	98	288	184	5.397	27.470	5.168
Jun-20	13	107	58	109	2.258	316
May-20	3	75	28	0	874	37
Abr-20	10	61	21	0	1.015	27
Mar-20	219	815	295	11.737	88914	12.235
Feb-20	338	1.382	451	23.552	209652	25.564
Ene-20	320	1.408	446	21.748	210195	25.256

**Tabla 36:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2020.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-19	341	1.393	442	23.951	212.226	26.064
Nov-19	353	1.558	455	25.487	225.694	27.600
Oct-19	369	1.613	476	26.641	246.516	30.376
Sep-19	341	1.368	471	24.782	219.384	28.784
Ago-19	330	877	440	24.808	142.060	28.627
Jul-19	350	1.293	486	27.264	214.292	31.272
Jun-19	339	1.429	489	24.947	227.105	28.475
May-19	362	1.582	489	23.342	235.167	26.745
Abr-19	344	1.456	447	23.794	216.645	25.657
Mar-19	358	1.571	507	26.123	228.359	32.115
Feb-19	332	1.427	467	23.366	206.809	25.562
Ene-19	366	1.524	515	25.179	200.134	27.646

**Tabla 37:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2019.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-18	379	1.443	520	25.181	208.758	28.780
Nov-18	342	1.556	510	23.705	212.894	26.684
Oct-18	380	1.653	560	25.483	232.159	31.514
Sep-18	371	1.387	552	24.657	198.358	31.361
Ago-18	378	938	553	26.758	135.203	31.176
Jul-18	382	1.336	557	27.953	196.082	33.112
Jun-18	356	1.428	564	24.737	213.075	30.440
May-18	370	1.556	588	24.158	229.147	30.223
Abr-18	353	1.469	580	24.059	225.980	30.099
Mar-18	364	1.489	559	25.989	222.770	32.641
Feb-18	330	1.394	526	23.169	202.327	27.384
Ene-18	361	1.463	537	25.158	194.454	28.015

**Tabla 38:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2018.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-17	376	1.360	503	25.129	192.049	28.797
Nov-17	364	1.525	501	26.487	198.704	28.749
Oct-17	374	1.538	562	26.355	217.755	30.634
Sep-17	352	1.367	566	23.539	196.402	30.013
Ago-17	361	869	580	25.964	128.554	32.605
Jul-17	370	1.256	582	25.008	195.737	30.990
Jun-17	355	1.466	521	23.882	214.372	28.176
May-17	367	1.552	517	21.745	219.314	26.490
Abr-17	359	1.336	497	23.477	201.395	26.729
Mar-17	380	1.572	529	25.646	219.368	29.440
Feb-17	337	1.374	481	22.204	183.227	24.454
Ene-17	361	1.296	490	23.927	174.232	26.105

**Tabla 39:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2017.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-16	372	1.230	499	23.689	180.507	26.544
Nov-16	367	1.440	503	25.879	202.383	28.480
Oct-16	364	1.442	484	24.511	218.310	27.009
Sep-16	356	1.357	490	23.243	201.500	26.682
Ago-16	365	860	525	24.359	125.637	29.136
Jul-16	369	1.340	526	23.681	194.512	27.162
Jun-16	357	1.481	479	22.642	219.653	25.327
May-16	378	1.534	489	22.207	220.817	24.267
Abr-16	363	1.523	484	22.541	207.703	23.885
Mar-16	385	1.415	524	25.748	200.059	27.509
Feb-16	349	1.442	493	22.744	188.587	23.067
Ene-16	359	1.322	495	21.236	167.830	22.454

**Tabla 40:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2016.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-15	369	1.261	484	21.305	172.049	22.439
Nov-15	357	1.483	477	21.264	199.092	25.550
Oct-15	365	1.560	519	22.374	229.383	28.274
Sep-15	363	1.379	485	23.193	199.636	26.322
Ago-15	358	907	504	24.243	133.214	29.261
Jul-15	366	1.416	514	25.820	201.402	28.152
Jun-15	353	1.421	487	23.152	196.065	26.245
May-15	372	1.535	492	21.424	207.301	23.868
Abr-15	355	1.476	473	21.705	188.059	23.750
Mar-15	368	1.545	490	23.452	200.209	26.436
Feb-15	336	1.377	442	20.162	169.209	20.961
Ene-15	349	1.375	486	20.077	158.409	20.849

**Tabla 41:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2015.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-14	348	1.333	464	20.248	171.525	21.084
Nov-14	362	1.507	477	21.710	181.595	24.494
Oct-14	372	1.719	499	23.065	213.999	24.265
Sep-14	353	1.435	501	22.472	191.313	24.554
Ago-14	362	957	495	24.498	123.136	25.557
Jul-14	366	1.539	496	25.011	193.025	24.848
Jun-14	268	1.619	476	25.855	197.144	23.817
May-14	180	1.723	487	21.033	206.379	21.282
Abr-14	181	1.655	526	19.013	193.383	20.583
Mar-14	186	1.805	452	18.183	199.643	19.932
Feb-14	172	1.558	385	16.345	173.973	16.536
Ene-14	182	1.551	423	16.191	165.533	17.107

**Tabla 42:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2014.  
Fuente: Aena [73].

Mes	Operaciones			Pasajeros		
	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC	MAD-ALC	MAD-BCN	MAD-VLC
Dic-13	185	1.496	421	16.882	171.794	16.397
Nov-13	182	1.787	410	17.586	190.100	18.282
Oct-13	242	1.894	482	23.044	220.554	20.938
Sep-13	248	1.469	478	24.486	181.777	21.706
Ago-13	218	1.168	435	20.966	134.317	19.416
Jul-13	244	1.609	487	25.634	192.171	22.200
Jun-13	245	1.676	525	27.277	200.569	24.922
May-13	256	1.946	568	26.008	212.332	23.060
Abr-13	203	1.905	549	21.368	198.282	23.219
Mar-13	248	1.595	467	21.936	163.216	23.202
Feb-13	231	1.613	448	19.913	166.057	19.610
Ene-13	276	1.702	500	24.537	187.692	20.678

**Tabla 43:** Número de operaciones y pasajeros en las 3 rutas de estudio en el año 2013.  
*Fuente: Aena [73].*

## B Pliego de condiciones

El pliego de condiciones es un texto que formaliza los requisitos técnicos y legales necesarios para llevar a cabo el Trabajo Final de Máster, además de brindar instrucciones sobre el uso adecuado de las instalaciones y equipos requeridos.

### Condiciones de seguridad e higiene

Según lo establecido en la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, publicada en el Boletín Oficial del Estado [109], se espera que los trabajadores participen activamente en la prevención de riesgos laborales y mantengan altos estándares de higiene en su entorno laboral. Se detallan las disposiciones que los empleados deben cumplir conforme a dicha ordenanza y sus directrices complementarias. Además, la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo también abarca las condiciones generales y las medidas de protección que deben seguirse en los lugares de trabajo, incluyendo los aspectos relacionados con la ejecución del proyecto actual.

- Obligaciones y derechos de los trabajadores:
  - Participar en programas de formación sobre Seguridad e Higiene, así como en cursos de salvamento y socorrismo en el entorno laboral, ya sea proporcionados por la empresa o a través del Plan Nacional.
  - Usar adecuadamente los equipos de protección personal y asegurarse de que estén en condiciones óptimas.
  - Reportar a los superiores cualquier avería, deficiencia u otro riesgo detectado en el lugar de trabajo.
  - Mantener una higiene personal adecuada para prevenir enfermedades y evitar incomodidades a los compañeros de trabajo.
  - Sujetarse a exámenes médicos, vacunas y/o inmunizaciones requeridas por las autoridades sanitarias o el servicio médico de la empresa.
  - Abstenerse de introducir bebidas u otras sustancias no autorizadas en el lugar de trabajo, así como de trabajar bajo los efectos del alcohol o sustancias tóxicas.
  - Colaborar en la extinción de incendios y en el rescate de víctimas en caso de accidentes laborales.

### Condiciones de los centros de trabajo

- Seguridad estructural. Implica que todos los edificios deben ser construidos de forma segura para prevenir posibles colapsos y daños ocasionados por condiciones climáticas adversas. Para asegurar esto, es necesario que los cimientos, pisos y otros componentes estructurales tengan la resistencia adecuada para soportar las cargas para las que han sido diseñados de manera segura.

Además, como medida para mantener esta seguridad, es obligatorio colocar señalizaciones que indiquen las cargas máximas que los espacios pueden soportar o sostener. Queda terminantemente prohibido sobrecargar los pisos y niveles de los edificios.

- Requisitos de espacio y volumen. Los lugares de trabajo deben cumplir con los siguientes estándares mínimos:
  - Una altura mínima de tres metros desde el suelo hasta el techo.

- Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
- Diez metros cúbicos de volumen por cada trabajador.

No obstante, en establecimientos comerciales, de servicios, oficinas y despachos, la altura mencionada anteriormente puede ser reducida a 2,5 metros, siempre y cuando se satisfaga la cubicación mínima por trabajador establecida en el punto anterior y haya una adecuada renovación del aire.

- Iluminación. Es necesario que todos los espacios de trabajo o áreas de tránsito dispongan de una iluminación apropiada, la cual puede ser natural, artificial o una combinación de ambas, adaptada a las tareas realizadas en dichos espacios. Se priorizará el aprovechamiento de la iluminación natural siempre que sea factible.

Además, se requiere aumentar la intensidad lumínica en máquinas peligrosas, zonas de paso con riesgo de caídas, escaleras y salidas de emergencia.

- Ventilación, temperatura y humedad. Es esencial mantener condiciones atmosféricas adecuadas en los entornos laborales y sus extensiones, ya sea mediante medios naturales o artificiales, para evitar el aire estancado, el exceso de calor o frío, la humedad o sequedad, y los olores desagradables. En ningún caso se permitirá que la proporción de dióxido de carbono en el ambiente supere los 50 partes por cada 10.000, ni que el monóxido de carbono sobrepase las 1 parte por cada 10.000.

En áreas de trabajo cerradas, se debe garantizar un suministro de aire fresco y limpio de al menos 30 a 50 metros cúbicos por hora y por trabajador, a menos que se realice una renovación total del aire varias veces por hora, no menos de seis veces para trabajos sedentarios y diez veces para trabajos que demanden un esfuerzo físico superior al normal.

La circulación del aire en espacios cerrados debe regularse para evitar corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda los 15 metros por minuto a temperatura normal, ni los 45 metros por minuto en ambientes muy calurosos.

En entornos laborales expuestos a temperaturas extremas, se deben evitar cambios bruscos y establecer límites normales de temperatura y humedad según la naturaleza del trabajo:

- Para trabajos sedentarios: entre 17 °C y 22 °C.
- Para tareas regulares: de 15 °C a 18 °C.
- Para trabajos que requieran un esfuerzo muscular intenso: de 12 °C a 15 °C.

La humedad relativa del ambiente debe mantenerse entre el 40 % y el 60 %, excepto en áreas donde haya riesgo de generación de electricidad estática, donde se limitará al 50 %.

Es imperativo proteger adecuadamente a todos los trabajadores contra la exposición directa y excesiva al calor. En casos de trabajos en espacios cerrados con temperaturas extremadamente altas o bajas, se limitará la permanencia de los trabajadores estableciendo, si es necesario, turnos adecuados.

- Ruidos, vibraciones y trepidaciones. Es crucial evitar o reducir al mínimo posible tanto el ruido como las vibraciones desde su origen, procurando limitar su propagación en los entornos laborales. Para ello, es esencial asegurar un anclaje adecuado de las máquinas y equipos generadores de ruido, vibración y sacudidas, garantizando

un equilibrio estático y dinámico óptimo. Esto puede lograrse mediante el uso de bancadas cuyo peso supere de 1.5 a 2.5 veces el peso de la máquina que sostienen, así como mediante el aislamiento de la estructura general o mediante otros recursos técnicos.

Además del anclaje, las máquinas que emitan ruidos o vibraciones molestas deben ser debidamente aisladas, y solo el personal responsable de su mantenimiento debe trabajar en el área correspondiente durante el tiempo necesario. Se debe prestar especial atención al cuidado y mantenimiento de las máquinas o equipos que generen vibraciones molestas o peligrosas para los trabajadores, en particular a los componentes móviles y a los dispositivos de transmisión de movimiento.

Por último, el control del ruido enérgico en los lugares de trabajo no se reduce únicamente al aislamiento de la fuente que los produce, sino que también se deben implementar medidas técnicas para prevenir la reflexión y resonancia que puedan alcanzar niveles perjudiciales para la salud de los trabajadores.

- Limpieza de instalaciones. Es esencial mantener siempre en óptimas condiciones de limpieza tanto los espacios de trabajo como sus áreas contiguas, realizando las limpiezas necesarias de forma regular. En lugares susceptibles de generar polvo, la limpieza se efectuará mediante métodos húmedos siempre que sea seguro, o mediante aspiración en seco si el proceso de producción lo permite.

Todos los ambientes deben ser objeto de una limpieza con la frecuencia adecuada, preferiblemente fuera del horario laboral y con suficiente anticipación para permitir la ventilación durante al menos treinta minutos antes del inicio de la jornada laboral.

En situaciones donde el trabajo es continuo, se implementarán precauciones especiales para evitar los efectos perjudiciales del polvo y los residuos, así como para minimizar cualquier obstáculo que la limpieza en sí pueda ocasionar en la labor. Las tareas de limpieza se llevarán a cabo con mayor precaución en las áreas cercanas a las máquinas, equipos o dispositivos que representen mayores riesgos. El suelo se mantendrá sin encharcamientos y libre de aceite, grasa y otras sustancias resbaladizas.

Respecto a los productos utilizados para la limpieza o desengrase, se dará preferencia a los detergentes. En situaciones donde sea imprescindible el uso de gasolina u otros derivados del petróleo para la limpieza o desengrase, queda estrictamente prohibido fumar.

### Condiciones para el trabajo con pantallas

El logro de los objetivos del proyecto requiere la elaboración de dos paneles de control, lo que implica que la totalidad del tiempo dedicado al proyecto involucre el uso del ordenador. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta las disposiciones establecidas en el Real Decreto 488/1997, emitido el 14 de abril [110], donde se detallan las medidas mínimas de seguridad y salud relacionadas con el uso de equipos con pantallas de visualización por parte de los trabajadores. La protección de la salud de los empleados en su lugar de trabajo se regula en la Ley 31/1995 del 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales.

Para prevenir riesgos para la salud, se deben aplicar una serie de medidas mínimas para los trabajadores que utilizan pantallas de visualización, cumpliendo con las obligaciones estipuladas en el anexo del mencionado decreto. Este anexo abarca aspectos como los equipos empleados, el ambiente laboral y la interacción entre el ordenador y el usuario.

- Equipos. Los dispositivos deben contar con pantallas lo suficientemente grandes que permitan ajustar el brillo y carezcan de efectos de parpadeo o reflejos. Además, deben ser ajustables para adaptarse a las necesidades de cada usuario.

Respecto al teclado, debe ser independiente del resto del equipo para permitir una postura cómoda al usuario. Asimismo, debe ser inclinable, tener una superficie mate para evitar reflejos y presentar letras con símbolos legibles. En cuanto al escritorio, debe ser lo suficientemente amplio para permitir una disposición flexible de todos los elementos necesarios. Por último, la silla de trabajo debe ofrecer una posición confortable, ajustándose a la curvatura de la zona lumbar, con altura regulable y permitiendo libertad de movimiento al usuario.

- Entorno. El lugar de trabajo debe proporcionar suficiente espacio y estar configurado para permitir el movimiento durante toda la jornada laboral. En cuanto a la iluminación, es fundamental asegurar niveles adecuados de luz y evitar deslumbramientos y reflejos en las pantallas. En este sentido, las ventanas deben contar con dispositivos de cobertura apropiados.

Además, es importante tener en cuenta el ruido y el calor generados por los equipos instalados para evitar incomodar a los trabajadores. Por último, se debe controlar tanto las emisiones de radiación como la humedad con el fin de salvaguardar la seguridad y la salud de los empleados.

- Conexión entre el ordenador y el trabajador. Cuando se elige o se modifica un programa, es crucial tener en cuenta cómo se adapta a las tareas de los trabajadores, a su nivel de conocimiento y a su facilidad de uso. Además, es esencial aplicar los principios de ergonomía al manejo de la información por parte de las personas.

## C Presupuesto

El objetivo de este anexo es evaluar el coste económico asociado a la realización de este proyecto. Para ello se calcula el coste económico del personal, del software empleado, costes generales, el beneficio industrial e impuestos.

### Mano de obra

La elaboración de este proyecto ha sido llevada a cabo por un equipo de dos personas, un ingeniero técnico aeronáutico en proceso de convertirse en ingeniero aeronáutico, es decir, en calidad de estudiante realizando su TFM y un profesor catedrático de la Universidad Politécnica de Valencia, en calidad de tutor del TFM.

De acuerdo con el convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería; oficinas de estudios técnicos; inspección, supervisión y control técnico y de calidad [111], el salario bruto anual de un ingeniero superior es de 28.664,12 € para el año 2024. Mientras que de acuerdo con la UPV [112], el salario anual para un catedrático de la universidad es de 47.573,82 €. Para calcular el coste de la mano de obra por hora, se considera un total de 250 días laborales al año y una jornada completa de 8 horas diarias.

En cuanto al tiempo dedicado, el estudiante ha trabajado en el proyecto durante 18 semanas (de mitad de febrero a mitad de junio) con una dedicación a media jornada, es decir, un total de 360 horas, destinadas a investigación, cálculos y redacción del proyecto. Por su parte, el profesor ha destinado un total de 30 horas para seguimiento y revisión del trabajo.

Se presenta en la tabla 44 el resumen del coste de mano de obra asociado a la elaboración del proyecto.

Personal	Tiempo dedicado (h)	Salario (€ / h)	Coste (€)
Ingeniero	360	14,33	5.159,54
Catedrático	30	23,79	713,61
Total	390		5.873,15

**Tabla 44:** Coste asociado a la mano de obra.

### Software

Por otro lado, es fundamental tener en cuenta los gastos relacionados con las licencias de los programas utilizados. En la tabla 45 se detallan los costes de cada licencia y la cantidad de licencias necesarias. Se presenta el coste anual de la licencia y el coste final asociado, considerando un periodo de trabajo de 4 meses.

Software	Coste licencia anual (€)	Coste (€)
GREET	gratuito	0
GABI	4.605,78	1535,26
Microsoft Office	126	42
Overleaf	369	123
Total		1700,26

**Tabla 45:** Coste asociado al Software necesario.

### Coste total

Por último, es necesario agregar a los costes previos los costes generales, que abarcan elementos como la electricidad, las instalaciones y el equipo utilizado. Estos se calcularán como un 15 % adicional al total de los costes mencionados anteriormente. Además, se añadirá un margen de beneficio industrial del 6 %, y finalmente, se aplicará un IVA del 21 %. El costo total para la elaboración del proyecto se presenta en la tabla 46.

Partida	Coste (€)
Mano de obra	5.873,15
Software	1700,26
Costes generales	1136,01
Beneficio industrial	522,57
IVA	1938,71
Total	11.170,70

**Tabla 46:** Coste total asociado a la realización del proyecto.

Por lo tanto, el presupuesto final para calcular el impacto medioambiental de la propuesta de ley para limitar los vuelos cortos con alternativa de tren en España, asciende a un total de **11.170,70 €**.

## D Relación del trabajo con los ODS de la agenda 2030

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				X
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>				X
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>		X		
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>			X	
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				X
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>		X		
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>		X		
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				X
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>		X		
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>				X
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>		X		
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>	X			
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>	X			
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>				X
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>				X
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				X
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>	X			

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

Para el ODS 12. Producción y consumo responsables, el TFM promueve la gestión eficiente de recursos y residuos, así como la adopción de energías renovables y la educación sobre prácticas sostenibles en los aeropuertos.

En relación con el ODS 13. Acción por el clima, el trabajo propone la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la implementación de tecnologías limpias y combustibles sostenibles, contribuyendo directamente a la mitigación del cambio climático.

Finalmente, respecto al ODS 17. Alianzas para lograr objetivos, el TFM fomenta la colaboración entre sectores públicos, privados y académicos para impulsar la innovación y las mejores prácticas sostenibles en la industria aeroportuaria.

## Bibliografía

- [1] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (visitado 20-02-2024) (vid. pág. 10).
- [2] «Acuerdo de Paris». En: *Naciones Unidas* (2015) (vid. págs. 10, 11, 19).
- [3] IEA (Agencia Internacional de Energía). *World Energy Outlook 2020*. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (visitado 20-02-2024) (vid. págs. 10, 11, 13, 14).
- [4] IEA (Agencia Internacional de Energía). *Emisiones de CO2 por sectores en 2019*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/greenhouse-gas-emissions-by-sector-2019-2> (visitado 20-02-2024) (vid. pág. 10).
- [5] UNFCCC. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs> (visitado 20-02-2024) (vid. pág. 11).
- [6] IPCC. *Global Warming of 1.5 °C*. URL: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (visitado 20-02-2024) (vid. págs. 11, 31, 46-48).
- [7] IPCC. *Temperatures*. URL: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/> (visitado 21-02-2024) (vid. págs. 11, 12).
- [8] IEA (Agencia Internacional de Energía). *Transport sector CO2 emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030*. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/transport-sector-co2-emissions-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030> (visitado 22-02-2024) (vid. págs. 12, 13).
- [9] ATAG (Air Transport Action Group). *Aviation: Benefits Beyond Borders*. URL: <https://aviationbenefits.org/> (visitado 22-02-2024) (vid. pág. 13).
- [10] IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> (visitado 22-02-2024) (vid. pág. 13).
- [11] ICAO (Organización de Aviación Civil Internacional). *Environmental Report 2019*. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx> (visitado 22-02-2024) (vid. pág. 13).
- [12] International Transport Forum (ITF) de la OCDE. *ITF Transport Outlook 2021*. URL: <https://www.itf-oecd.org/itf-transport-outlook-2021> (visitado 22-02-2024) (vid. pág. 14).

- [13] Comisión Europea. *The European Green Deal*. URL: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (visitado 23-02-2024) (vid. págs. 14, 46).
- [14] INE (Instituto Nacional de Estadística). *Aportación del turismo a la economía española. - Año 2022*. URL: [https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=estadistica\\_C&cid=1254736169169&menu=ultiDatos&idp=1254735576863#:~:text=La%20actividad%20tur%C3%ADstica%20alcanz%C3%B3%20los,%2C3%25%20del%20empleo%20total](https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=estadistica_C&cid=1254736169169&menu=ultiDatos&idp=1254735576863#:~:text=La%20actividad%20tur%C3%ADstica%20alcanz%C3%B3%20los,%2C3%25%20del%20empleo%20total). (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 15).
- [15] La Moncloa. *La llegada de turistas internacionales en 2023 supera las previsiones y alcanza por primera vez los 85 millones*. URL: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/industria-turismo/Paginas/2024/020224-record-turistas-internacionales.aspx#:~:text=El%20n%C3%BAmero%20de%20turistas%20internacionales,el%20a%C3%B1o%20de%20referencia%20prepandemia>. (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 15).
- [16] MITMA. *Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030*. URL: <https://www.transportes.gob.es/ministerio/planes-estrategicos/esmovilidad> (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 15).
- [17] RENFE. *Alta Velocidad, un caso de éxito*. URL: <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-viajeros/viajeros-conocenos/alta-velocidad> (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 15).
- [18] MITMA. *Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT)*. URL: <https://www.transportes.gob.es/plan-estrategico-de-infraestructuras-y-transporte-peit> (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 15).
- [19] EEA (European Environment Agency). *Reducing environmental impacts of transport*. URL: <https://www.eea.europa.eu/media/infographics/reducing-environmental-impacts-of-transport-1/view> (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 15).
- [20] UIC (Internacional Union of Railways). «High speed rail. Fast track to sustainable mobility». En: [www.uic.org](http://www.uic.org) (jun. de 2015) (vid. pág. 15).
- [21] RENFE. *Mapa de líneas AVE y Larga Distancia*. URL: <https://www.renfe.com/es/es/viajar/informacion-util/mapas-y-lineas/ave-y-larga-distancia> (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 16).
- [22] enterat.com. *Aeropuertos España 2024*. URL: <https://www.enterat.com/servicios/mapa-aeropuertos-espana.php> (visitado 24-02-2024) (vid. pág. 17).
- [23] MITECO. *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030*. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html> (visitado 25-02-2024) (vid. pág. 18).
- [24] Gobierno de España. *Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia*. URL: <https://planderrecuperacion.gob.es/> (visitado 25-02-2024) (vid. pág. 18).

- [25] BOE. *Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética*. URL: <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7/con> (visitado 25-02-2024) (vid. pág. 18).
- [26] Comisión Europea. *El Pacto Verde Europeo*. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es) (visitado 25-02-2024) (vid. pág. 18).
- [27] Newtral. *La propuesta de Sumar y el PSOE sobre los vuelos cortos*. URL: [https://www.newtral.es/psoe-sumar-vuelos-cortos/20231025/#google\\_vignette](https://www.newtral.es/psoe-sumar-vuelos-cortos/20231025/#google_vignette) (visitado 25-02-2024) (vid. pág. 19).
- [28] BOE. *Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática*. URL: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2021-80937> (visitado 25-02-2024) (vid. pág. 19).
- [29] MITMA. «Movilidad y transporte en tiempos de COVID-19». En: <https://observatoriotransporte.m> (dic. de 2020) (vid. pág. 19).
- [30] AENA. *Informes anuales*. URL: <https://www.aena.es/es/estadisticas/informes-anuales.html> (visitado 26-02-2024) (vid. págs. 20, 38, 64).
- [31] MITMA. *Informes del transporte aéreo en España 2023*. URL: <https://www.transportes.gob.es/aviacion-civil/estudios-y-publicaciones/estadisticas-del-sector/informes-del-transporte-aereo-en-espana-2023> (visitado 26-02-2024) (vid. pág. 20).
- [32] AVIACIONLINE. *Aena licita el servicio de seguridad privada para los aeropuertos de su red en España*. URL: <https://www.aviacionline.com/2023/05/aena-licita-el-servicio-de-seguridad-privada-de-todos-los-aeropuertos-de-su-red-en-espana/> (visitado 28-02-2024) (vid. pág. 20).
- [33] AENA. *Finaliza el proceso de asignación de las licencias para el servicio de asistencia en tierra a las compañías aéreas*. URL: <https://www.aena.es/es/prensa/finaliza-el-proceso-de-asignacion-de-las-licencias-para-el-servicio-de-asistencia-en-tierra-a-las-companias-aereas.html&p=1575078740846> (visitado 28-02-2024) (vid. pág. 20).
- [34] ICEX. *España, enclave logístico*. URL: [https://www.investinspain.org/content/icex-invest/es/why\\_spain/why\\_spain\\_infraestructuras.html](https://www.investinspain.org/content/icex-invest/es/why_spain/why_spain_infraestructuras.html) (visitado 28-02-2024) (vid. pág. 20).
- [35] Air Europa. *Nuevas rutas Air Europa*. URL: <https://www.aireuropa.com/es/es/aea/ofertas/nuevas-rutas.html> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [36] Vigo.es. *Air Nostrum recuperará los vuelos entre Vigo y Bilbao en 2024*. URL: <https://www.vigoe.es/viajes/espana/air-nostrum-recuperara-los-vuelos-entre-vigo-y-bilbao-en-2024-y-ya-vende-billetes-para-ir-a-mallorca-en-verano/> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).

- [37] Diario Córdoba. *Air Nostrum operará vuelos regulares desde el aeropuerto de Córdoba a Canarias y Mallorca*. URL: <https://www.diariocordoba.com/cordoba-ciudad/2024/01/25/air-nostrum-operara-vuelos-regulares-97304152.html> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [38] Nexotur. *Air Nostrum abre una ruta invernal entre Andorra y Mallorca para 2024*. URL: <https://www.nexotur.com/noticia/121304/nexotur/air-nostrum-abre-una-ruta-invernal-entre-andorra-y-mallorca-para-2024.html> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [39] ElEspañol. *Sevilla tendrá cinco nuevos vuelos internacionales*. URL: [https://www.lespanol.com/sevilla/20240125/sevilla-nuevos-vuelos-internacionales-ryanair-air-nostrum-scandinavian-airlines/827667557\\_0.html](https://www.lespanol.com/sevilla/20240125/sevilla-nuevos-vuelos-internacionales-ryanair-air-nostrum-scandinavian-airlines/827667557_0.html) (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [40] Iberia. *Los nuevos destinos de Iberia*. URL: <https://www.iberiaplusmagazine.iberia.com/articulos/2021/5/los-nuevos-destinos-de-iberia/> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [41] Ryanair. *Ryanair anuncia su calendario del verano 2024 en Tenerife*. URL: [https://corporate.ryanair.com/spanish/ryanair-anuncia-su-calendario-del-verano-2024-en-tenerife/#:~:text=8%20nuevas%20rutas%20\(Budapest%2C%20Cardiff,%2C%20Weeze%2C%20Pisa%20y%20Toulouse\)](https://corporate.ryanair.com/spanish/ryanair-anuncia-su-calendario-del-verano-2024-en-tenerife/#:~:text=8%20nuevas%20rutas%20(Budapest%2C%20Cardiff,%2C%20Weeze%2C%20Pisa%20y%20Toulouse)) (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [42] Aviacionline. *Ryanair lanza cinco nuevas rutas desde cinco aeropuertos de España*. URL: <https://www.aviacionline.com/2024/01/ryanair-lanza-cinco-nuevas-rutas-desde-cinco-aeropuertos-de-espana> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [43] ValenciaPlaza. *Ryanair anuncia seis nuevas rutas desde València para este verano*. URL: <https://valenciaplaza.com/ryanair-seis-nuevas-rutas-valencia-verano> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [44] Volotea. *Volotea anuncia la apertura de una nueva base operativa en Bari*. URL: <https://www.volotea.com/es/sala-de-prensa/noticias/volotea-anuncia-la-apertura-de-una-nueva-base-operativa-en-bari-italia-la-21-de-la-aerolinea/> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 21).
- [45] aerolatinnews. *Aerolíneas: la sostenibilidad requiere de incentivos y no más impuestos*. URL: <https://aerolatinnews.com/destacado/aerolineas-la-sostenibilidad-requiere-de-incentivos-y-no-mas-impuestos/> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 22).
- [46] LaVanguardia. *La sostenibilidad llega a las aerolíneas*. URL: <https://www.lavanguardia.com/economia/20190920/47480557518/sostenibilidad-llega-aerolineas.html> (visitado 01-03-2024) (vid. pág. 22).
- [47] Expansion. *La sostenibilidad llega a las aerolíneas*. URL: <https://www.expansion.com/sector/ferroviario/20240304/la-sostenibilidad-llega-a-las-aerolineas.html> (visitado 04-03-2024) (vid. pág. 22).

- [48] ElPais. *La sostenibilidad llega a las aerolíneas*. URL: [La%20liberalizaci%C3%B3n%20ferroviaria,%20un%20motor%20para%20la%20econom%C3%ADa%20y%20la%20nueva%20movilidad](https://www.elpais.com/comunicacion/2023/03/20/la-sostenibilidad-llega-a-las-aerolineas-20230320.html) (visitado 04-03-2024) (vid. pág. 22).
- [49] AESA. *AESA se suma a la Alianza para la Sostenibilidad del Transporte Aéreo*. URL: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/noticias/aesa-se-suma-la-alianza-para-la-sostenibilidad-del-transporte-aereo> (visitado 04-03-2024) (vid. pág. 23).
- [50] Expansion. *Más de 900 empresas y entidades se alían para descarbonizar el sector aéreo*. URL: <https://www.expansion.com/economia-sostenible/2023/04/17/643d3589e5fdeaf2278b459d.html> (visitado 04-03-2024) (vid. pág. 23).
- [51] Expansion. *Sostenibilidad del sector aéreo. Medidas de mitigación frente al Cambio Climático y preservación de la Calidad del Aire Local*. URL: [https://www.seguridadaerea.gob.es/es/\\_ambitos/sostenibilidad-del-sector-a%C3%A9reo-medidas-de-mitigaci%C3%B3n-frente-al-cambio-clim%C3%A1tico-y](https://www.seguridadaerea.gob.es/es/_ambitos/sostenibilidad-del-sector-a%C3%A9reo-medidas-de-mitigaci%C3%B3n-frente-al-cambio-clim%C3%A1tico-y) (visitado 04-03-2024) (vid. pág. 23).
- [52] EuropaPress. *El Ministerio de Ciencia lanza el Programa Tecnológico Aeronáutico, dotado con 160 millones 'europeos' hasta 2023*. URL: <https://www.europapress.es/ciencia/noticia-ministerio-ciencia-lanza-programa-tecnologico-aeronautico-dotado-160-millones-europeos-2023-20210218103810.html> (visitado 05-03-2024) (vid. pág. 23).
- [53] ICEX. *El sector aeroespacial y de defensa está ampliamente desarrollado en España*. URL: <https://www.investinspain.org/content/icex-invest/es/sectors/aerospace.html> (visitado 05-03-2024) (vid. pág. 23).
- [54] Xakata. *Adiós a los vuelos cortos en España: el pacto de Sumar y PSOE contempla sustituirlos cuando haya alternativas en tren*. URL: <https://www.xakata.com/movilidad/adios-a-vuelos-cortos-espana-pacto-sumar-psoe-contempla-sustituirlos-cuando-haya-alternativas-tren> (visitado 05-03-2024) (vid. pág. 23).
- [55] DiarioCórdoba. *PSOE y Sumar pactan impulsar la reducción de vuelos cortos en las rutas con alternativa inferior a 2,5 horas en tren*. URL: <https://www.diariocordoba.com/economia/2023/10/24/psoe-sumar-pactan-impulsar-reduccion-93742030.html> (visitado 05-03-2024) (vid. pág. 23).
- [56] COIAE. *Comunicado del COIAE sobre la posible prohibición de vuelos cortos domésticos*. 25 de oct. de 2023. URL: <https://coiae.es/comunicado-del-coiae-sobre-la-posible-prohibicion-de-vuelos-cortos-domesticos/> (visitado 04-01-2024) (vid. págs. 23, 27).
- [57] Newtral. *La propuesta de Sumar y el PSOE sobre los vuelos cortos*. URL: <https://www.newtral.es/psoe-sumar-vuelos-cortos/20231025/> (visitado 04-01-2024) (vid. págs. 23, 32).

- [58] LaVanguardia. *El Gobierno plantea eliminar los vuelos más cortos y tributar por el uso real del coche*. URL: <https://www.lavanguardia.com/economia/20210521/7470977/eliminar-vuelos-cortos-uso-coche-informe-espana.html> (visitado 05-03-2024) (vid. pág. 23).
- [59] Asociación Española de Normalización. «Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (ISO 14040:2006)». En: *AENOR* (27 de dic. de 2006) (vid. págs. 24, 25).
- [60] Asociación Española de Normalización. «Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1. (ISO 14040:2006/Amd 1:2020)». En: *AENOR* (12 de ene. de 2022) (vid. págs. 24, 25).
- [61] Asociación Española de Normalización. «Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006)». En: *AENOR* (27 de dic. de 2006) (vid. págs. 24-26).
- [62] Asociación Española de Normalización. «Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1. (ISO 14044:2006/Amd 1:2017)». En: *AENOR* (14 de nov. de 2018) (vid. págs. 24-26).
- [63] Asociación Española de Normalización. «Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 2. (ISO 14044:2006/Amd 2:2020)». En: *AENOR* (21 de jul. de 2021) (vid. págs. 24-26).
- [64] J. B. Guinée et al. «Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards». En: *Kluwer Academic Publishers* (2002) (vid. págs. 24-26).
- [65] G. Finnveden et al. «Recent developments in Life Cycle Assessment». En: *Journal of Environmental Management* (2009) (vid. págs. 24-26).
- [66] G. Rebitzer et al. «Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications». En: *Environment International* (2004) (vid. págs. 24, 26).
- [67] M. Z. Hauschild et al. «Life Cycle Assessment: Theory and Practice». En: *Springer* (2018) (vid. págs. 24, 26).
- [68] R. Heijungs y S. Suh. «The Computational Structure of Life Cycle Assessment. ECO-Efficiency in Industry and Science». En: *Springer* (2002) (vid. pág. 25).
- [69] M. Z. Hauschild y M. A. J. Huijbregts. «Life Cycle Impact Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment». En: *Springer* (2015) (vid. pág. 25).
- [70] Pablo Muñoz Nieto. «Eliminación de vuelos cortos en España: estudio de impacto y viabilidad». En: *Ecologistas en Acción* (18 de oct. de 2023) (vid. págs. 27, 31-33).



- [84] A. García. «Diseño de motores de aviación comercial». En: *AENA Aeropuertos* (2008) (vid. pág. 48).
- [85] Renfe. *AVE modelo S-103*. URL: <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes/s-103> (visitado 15-05-2024) (vid. págs. 48, 60).
- [86] Ecoinvent. «Transport services». En: *Swiss centre for LCI* (2007) (vid. pág. 48).
- [87] J.M. Desantes et al. «Comparative global warming impact and NOX emissions of conventional and hydrogen automotive propulsion systems». En: *CMT-UPV* (2020) (vid. págs. 49, 59, 70).
- [88] SkyNRG. *Building of first alcohol to jet plant in Europe*. URL: <https://skynrg.com/> (visitado 22-05-2024) (vid. pág. 49).
- [89] SimpliFlying. *Pathways to Sustainable Aviation Fuel*. URL: <https://simpliflying.com/> (visitado 22-05-2024) (vid. pág. 49).
- [90] European Comission. *Transport and the Green Deal*. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/transport-and-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/transport-and-green-deal_en) (visitado 20-06-2024) (vid. pág. 49).
- [91] ICCT. *On the electrification path: europe's progress towards clean transportation*. URL: <https://theicct.org/publication/on-the-electrification-path-europes-progress-towards-clean-transportation/> (visitado 20-06-2024) (vid. pág. 49).
- [92] DGT. *Anuario Estadístico General 2022*. URL: [https://www.dgt.es/export/sites/web-DGT/.galleries/downloads/dgt-en-cifras/publicaciones/Anuario\\_Estadistico\\_General/Anuario-Estadistico-General-2022-v2.pdf](https://www.dgt.es/export/sites/web-DGT/.galleries/downloads/dgt-en-cifras/publicaciones/Anuario_Estadistico_General/Anuario-Estadistico-General-2022-v2.pdf) (visitado 20-05-2024) (vid. pág. 50).
- [93] ICIS Explore. *Spain's regulatory environment to boost EV sales, charging infrastructure*. URL: <https://www.icis.com/explore/resources/news/2021/10/27/10698903/e-mobility-spotlight-spain-s-regulatory-environment-to-boost-ev-sales-charging-infrastructure/> (visitado 05-06-2024) (vid. pág. 50).
- [94] BCG Global. *Why electric cars can't come fast enough*. URL: <https://www.bcg.com/publications/2021/why-evs-need-to-accelerate-their-market-penetration> (visitado 05-06-2024) (vid. pág. 50).
- [95] IEA (Agencia Internacional de Energía). *An updated roadmap to Net Zero Emissions by 2050*. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/an-updated-roadmap-to-net-zero-emissions-by-2050> (visitado 05-06-2024) (vid. pág. 50).
- [96] Flightradar24. *Flightradar24: Live Flight Tracker*. URL: <https://www.flightradar24.com/39.43,-0.47/6> (vid. pág. 52).

- [97] ATC Magazine. *Eficiencia y gestión de combustible*. URL: [https://issuu.com/spanishatcmagazine/docs/atc\\_n\\_116\\_web\\_/s/27911140](https://issuu.com/spanishatcmagazine/docs/atc_n_116_web_/s/27911140) (visitado 30-04-2024) (vid. pág. 52).
- [98] ICAO. *CORSIA Eligible Fuels*. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-Eligible-Fuels.aspx> (visitado 15-05-2024) (vid. págs. 53-56, 73).
- [99] Statista. *Número de pasajeros que usaron el tren de alta velocidad AVE entre Madrid y Barcelona*. URL: <https://es.statista.com/estadisticas/486742/trafico-de-pasajeros-del-tren-de-alta-velocidad-ave-madrid-barcelona/> (visitado 25-05-2024) (vid. pág. 60).
- [100] DGT. «Anuario Estadístico General - 2019». En: *Ministerio del Interior* (2020) (vid. pág. 60).
- [101] The international council on clean transportation. *Fuel efficiency trends for new commercial jet aircraft: 1960 to 2014*. URL: <https://theicct.org/publication/fuel-efficiency-trends-for-new-commercial-jet-aircraft-1960-to-2014/> (visitado 16-06-2024) (vid. pág. 72).
- [102] IATA. *SAF Volumes Growing but Still Missing Opportunities*. URL: <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/> (visitado 07-06-2024) (vid. págs. 73, 77).
- [103] Clean Sky 2. «Hydrogen-powered aviation». En: *Publications Office of the European Union* (mayo de 2020) (vid. págs. 74, 77).
- [104] European Commission. *The SESAR Project*. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky/sesar-project\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/single-european-sky/sesar-project_en) (visitado 16-06-2024) (vid. págs. 75, 77).
- [105] ENAIRE. *Cielo Único Europeo*. URL: [https://www.enaire.es/sobre\\_enaire/presencia\\_internacional/cielo\\_unico\\_europeo](https://www.enaire.es/sobre_enaire/presencia_internacional/cielo_unico_europeo) (visitado 07-06-2024) (vid. págs. 75, 77).
- [106] OACI. *Economic Fuel Tankering: A Threat to Aviation Decarbonisation*. URL: [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\\_Art38.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art38.pdf) (visitado 07-06-2024) (vid. pág. 76).
- [107] Eurocontrol. *Fuel Tankering: economic benefits and environmental impact*. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-01/eurocontrol-think-paper-1-fuel-tankering.pdf> (visitado 07-06-2024) (vid. pág. 76).
- [108] IAG. *Combustible sostenible de aviación*. URL: <https://www.iairgroup.com/es/sostenibilidad/combustible-sostenible-de-aviacion/#:~:text=El%20SAF%20reduce%20las%20emisiones,total%20de%20combustible%20en%202050.> (visitado 25-05-2024) (vid. pág. 77).

- [109] Ministerio de Trabajo. *Orden de 9 de marzo de 1971 por la que se aprueba la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo*. URL: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1971-380> (visitado 07-06-2024) (vid. pág. 87).
- [110] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. *Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización*. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/488> (visitado 07-06-2024) (vid. pág. 89).
- [111] Ministerio de Trabajo y Economía Social. *Resolución de 12 de marzo de 2024, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registran y publican las tablas salariales para 2024 del XX Convenio colectivo nacional de empresas de ingeniería, oficinas de estudios técnicos, inspección, supervisión y control técnico y de calidad*. URL: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2024-5873](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2024-5873) (visitado 30-05-2024) (vid. pág. 91).
- [112] UPV. *Retribuciones profesorado funcionario en base a la ley de presupuestos para el ejercicio 2024*. URL: <https://www.upv.es/entidades/SRH/retribuciones/U0955471.pdf> (visitado 30-05-2024) (vid. pág. 91).