

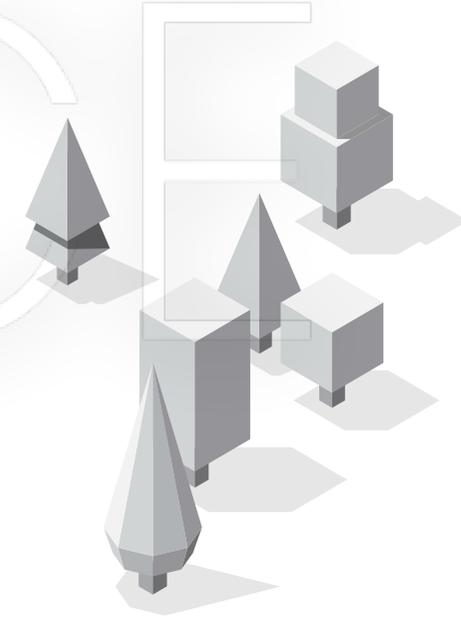
The logo for Carbon Track 360 features a stylized white circular graphic composed of three interconnected nodes and lines, resembling a network or a carbon cycle.

arBON Track360

Herramienta de análisis para la reflexión
del impacto ambiental del transporte



ÍNDICE

A stylized 3D graphic featuring several grey, geometric shapes resembling trees and rectangular blocks of varying heights, arranged in a cluster to the right of the word 'ÍNDICE'.

1 Transporte y clima: una visión 360° del impacto real	6
2 Las emisiones en el ciclo de vida	8
3 Emisiones en el modo ferroviario	12
4 Emisiones en el modo aéreo	18
5 CarbonTrack360. Motivación y supuestos	24
6 Identificar las claves de la eficiencia climática	28
7 Una visión de la red española	34
8 Una mirada al impacto 360° del transporte	42

1 TRANSPORTE Y CLIMA: UNA VISIÓN 360° DEL IMPACTO REAL

El cambio climático, como uno de los mayores desafíos globales y trascendentales, exige ser abordado con planteamientos rigurosos, alejados de banderas o eslóganes. El transporte es una actividad intensiva en el uso de energía y contribuye significativamente a las emisiones atmosféricas, especialmente a las de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En España, el subsector transporte fue responsable del 32,5 % de estas emisiones en 2023, con la carretera representando el 30,1 % del total y el transporte aéreo nacional aportando el 1,2 %.

Estas cifras, que ya ponen el foco en este sector, solo incluyen las emisiones operativas del transporte, ya que las de otras etapas del ciclo de vida de las infraestructuras y vehículos (construcción, mantenimiento, remodelación y desmantelamiento) se registran en otras categorías.

Si realmente queremos avanzar hacia los objetivos climáticos, necesitamos mirar el impacto del transporte de forma más completa, considerando todas las etapas de su vida útil. Esto nos ayudará, por un lado, a tomar decisiones más realistas y, por otro, a enfocar los avances tecnológicos en aque-

llas actividades que de verdad pueden marcar la diferencia a la hora de reducir las emisiones contaminantes del sistema de transporte.

Hoy en día existen muchas herramientas que permiten calcular las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante la fase de operación del transporte. También en los estudios de impacto ambiental se incluyen estimaciones sobre las emisiones generadas durante la construcción. Sin embargo, sigue faltando una herramienta que permita medir de forma global todas las emisiones a lo largo del ciclo de vida completo, teniendo en cuenta la infraestructura como el punto central por el que circulan vehículos y pasajeros. Es precisamente en esa infraestructura donde sería posible obtener una visión integral del impacto ambiental del sistema de transporte.

Además, el cálculo acumulado de las emisiones permite apreciar el perfil temporal de éstas en cada modo, sin perder la perspectiva de futuro y de eficiencia.



LAS EMISIONES EN EL CICLO DE VIDA

Los Inventarios Nacionales de Emisiones, responsables del reporte de las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes, solo proporcionan los datos de la fase de operación del transporte. En el contexto actual de emergencia climática, analizar el impacto de un modo de transporte únicamente desde una perspectiva operativa resulta insuficiente. Es fundamental adoptar un enfoque de análisis del ciclo de vida (ACV) de las emisiones de GEI, que contemple desde la extracción de materias primas, la fabricación de materiales, el transporte, la construcción, la operación y mantenimiento, hasta la demolición y gestión de residuos.

Este enfoque integral permite identificar los verdaderos puntos críticos de emisiones a lo largo del tiempo, muchos de los cuales se concentran

en etapas previas al transporte, como ocurre con el uso intensivo de cemento, acero o asfalto. Ignorar estas fases puede llevar a decisiones erróneas, como priorizar soluciones que aparentan ser sostenibles en su fase operativa, pero que implican una elevada huella de carbono en su construcción. Además, el ACV permite comparar alternativas de diseño, materiales y tecnologías desde una perspectiva climática, facilitando decisiones más informadas y alineadas con los objetivos de descarbonización y la priorización de medidas de reducción de las emisiones en las fases más intensivas de cada alternativa.

En el caso de las infraestructuras de transporte, donde las inversiones son intensivas y los activos tienen una larga vida útil, este análisis cobra aún más relevancia, ya que permite anticipar impac-

tos futuros y diseñar infraestructuras resilientes y bajas en carbono desde su concepción.

Incorporar el ciclo de vida en la evaluación climática no solo mejora la precisión del análisis, sino que también promueve una cultura de responsabilidad ambiental en todo el proceso de planificación y ejecución de infraestructuras, y permite actuar acorde a los objetivos de desarrollo sostenible y las políticas de transporte de la Unión Europea.

El ciclo de vida del transporte abarca todas las etapas desde su concepción hasta su desmantelamiento, considerando los impactos económicos, sociales y ambientales asociados.

La primera fase, que no genera emisiones de manera directa, pero es fundamental para tomar las mejores decisiones desde el inicio, es la Planificación y diseño, en la que se identifican las necesidades de transporte, se realizan estudios de viabilidad y se diseña técnicamente la infraestructura. Es crucial considerar los impactos ambientales y sociales desde el inicio para minimizar efectos negativos futuros.

1. Etapa de construcción

Incluye la ejecución de las obras civiles necesarias para materializar la infraestructura. Esta etapa suele implicar un consumo significativo de recursos naturales y energía, así como la generación de emisiones y residuos tanto por la maquinaria de obra, como por las emisiones derivadas de la propia generación de los materiales. Podría incluirse aquí también la fabricación de los vehículos, aunque por el momento no han sido incluidos en la herramienta Carbontrack360.

2. Etapa de operación, explotación y mantenimiento

Durante la vida útil de la infraestructura, es cuando se producen las operaciones de transporte y, sobre la infraestructura y vehículos, se llevan a cabo actividades de explotación y mantenimiento para garantizar su funcionalidad y seguridad. Todas estas actividades también generan impactos ambientales.

ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DEL TRANSPORTE



Fuente: Elaboración propia

3. Etapa de renovación

Una vez cubierto el ciclo de vida útil, las infraestructuras de transporte pueden ser renovadas, lo que implica tanto obras civiles como sustitución de equipamientos. En el caso de los vehículos, también requieren ciertas actividades y sustituciones, con los impactos que esto conlleva. Por el momento, esta etapa no ha sido incluida en la herramienta Carbontrack360.

4. Etapa de desmantelamiento

Finalmente, tanto infraestructura como vehículos deberían ser desmantelados. Esta fase implica la gestión de residuos y la posible recuperación de materiales, así como la evaluación de la necesidad de nuevas inversiones.

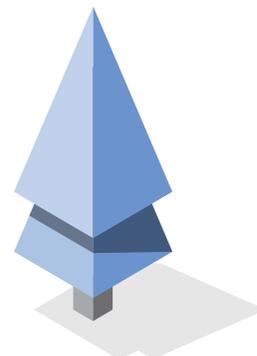
Dentro de las etapas emisoras de carbono a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura, se identifican las fases más emisoras para los modos ferroviario y aéreo:

FASES INTENSIVAS EN CARBONO PARA LOS MODOS FERROVIARIO Y AÉREO



Fuente: elaboración propia

La vida útil de la infraestructura es quizá el factor más importante cuando se comparan las emisiones derivadas de la generación de materiales durante el ciclo de vida de la misma porque la energía incorporada, generalmente se amortiza a lo largo de una vida útil de servicio de la infraestructura. Como resultado, la vida útil de una infraestructura y las emisiones incorporadas anualizadas de materiales tienen una correlación inversa, lo que significa que las emisiones disminuyen con una mayor vida útil de la misma.



EMISIONES EN EL MODO FERROVIARIO

En el caso del transporte ferroviario, suele prestarse atención casi exclusivamente a sus bajas emisiones durante la etapa de operación, especialmente cuando funciona con electricidad de origen renovable. Sin embargo, esta visión deja fuera una parte clave del impacto climático del tren: la construcción de infraestructuras. Las vías, túneles, viaductos y estaciones requieren grandes cantidades de materiales y energía para su construcción, lo que genera una proporción significativa de las emisiones totales. Por eso, si queremos comparar el ferrocarril con otros modos de trans-

porte de forma neutral, es imprescindible tener en cuenta todo su ciclo de vida.

Etapa de construcción

En el caso de la infraestructura ferroviaria, las actividades más intensivas en carbono son las relacionadas con los materiales (más del 80 % de las emisiones del ciclo de vida completo de la infraestructura ferroviaria). Esta abarca las emisiones de carbono derivadas del proceso de producción de materiales de construcción, incluida la extracción de sus componentes en bruto, su

posterior proceso de fabricación y su transporte. Estas actividades representan las emisiones aguas arriba o frontales de los impactos del ciclo de vida, que también se conocen como emisiones incorporadas o embebidas en un producto o material.

Por los volúmenes de materiales empleados en las obras ferroviarias, la mayor parte de las emisiones por materiales se debe al hormigón, el acero y las tierras y gravas, que se emplean principalmente en la construcción de la plataforma y la superestructura, y en los sistemas de electrificación. De estos materiales, se identifican potenciales mejoras que podrían suponer una importante reducción en las emisiones de la etapa de construcción:

Respecto a las emisiones derivadas del uso de la maquinaria, se incrementan en función de lo abrupto del terreno y las necesidades de estructuras. A mayor número de estructuras (viaductos, túneles, muros de contención, etc.), mayores serán las emisiones, especialmente cuando se precisan grandes trabajos de tunelación.

POTENCIALES MEJORAS RESPECTO A LAS EMISIONES EN MATERIALES



Fuente: elaboración propia

Etapa de operación

En el caso del ferrocarril de alta velocidad, las emisiones durante la etapa de operación se consideran nulas, ya que, toda la red de alta velocidad está electrificada, y en España el total de la energía consumida por la alta velocidad es energía eléctrica con Garantía de Origen Renovable (GdO).

La energía eléctrica con GdO renovable es un mecanismo de certificación regulado por la CNMC¹ en España, que permite acreditar que una cantidad determinada de electricidad ha sido generada a partir de fuentes renovables o de cogeneración de alta eficiencia.

Aunque físicamente la electricidad que circula por la red es una mezcla de distintas fuentes, la adquisición de GdOs garantiza, en términos contables, que el consumo eléctrico se corresponde con generación renovable. Este enfoque, coherente con las metodologías de etiquetado energético adoptadas a nivel europeo, permite clasificar el transporte ferroviario como un modo de movilidad de “cero emisiones operativas”.

Etapa de mantenimiento de la infraestructura ferroviaria

Aunque menos intensivo en emisiones que la construcción, también se contribuye significativamente a la huella de carbono del sistema ferroviario. Esto se debe principalmente a:

- El uso de maquinaria pesada (diésel o eléctrica).
- Transporte de materiales (balasto, rieles, traviesas).
- Sustitución de componentes y residuos generados.
- Energía utilizada en talleres y almacenes.

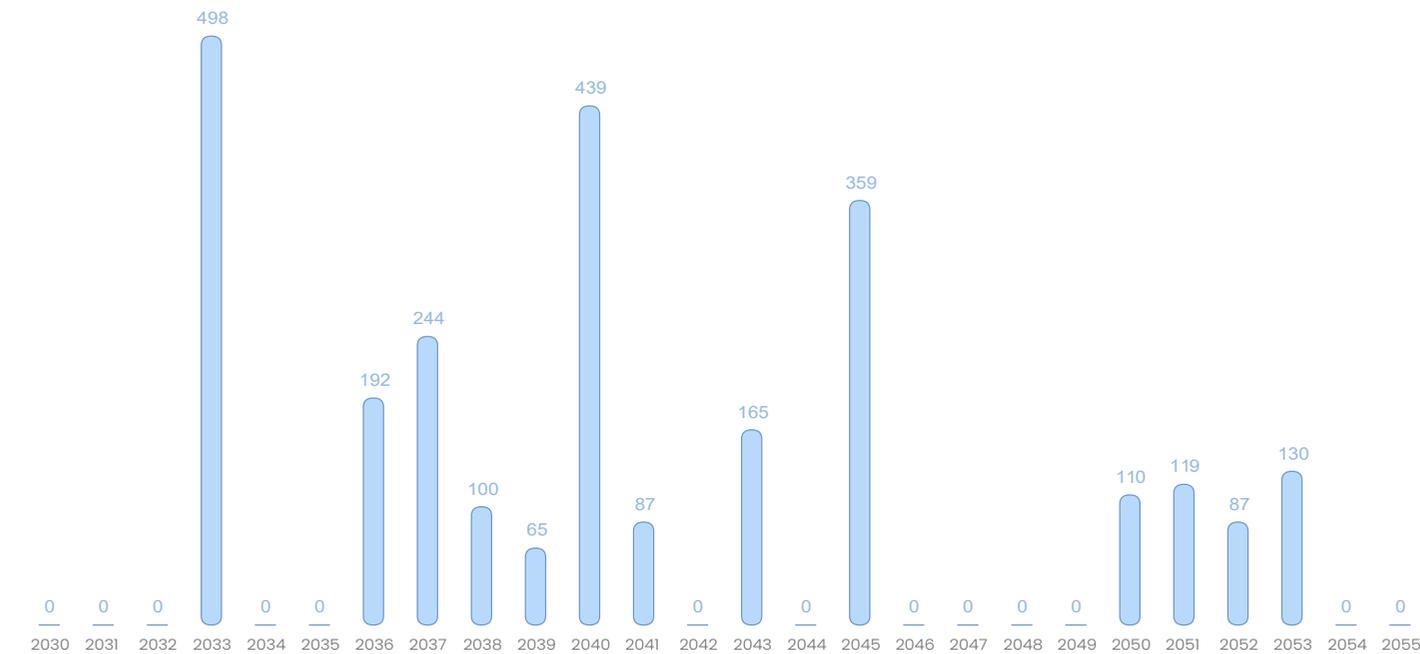
En este sentido se considera que un buen mantenimiento también contribuye a la minimización de las emisiones en operación de la infraestructura ya que permite una mejor gestión de los tráficos, las velocidades y el consumo energético de la infraestructura en general, y permite maximizar el ciclo de vida de la misma.

Etapa de renovación de la infraestructura ferroviaria

Se generan emisiones de GEI, de manera similar a la etapa de construcción, especialmente vinculadas a la fabricación y el transporte de materiales, y su instalación. En el caso de la red española de Alta Velocidad, a medida que los distintos elementos de los 4.000 km de red cumplan su periodo de vida útil, es previsible que los trabajos de renovación supongan un importante esfuerzo inversor y, por lo tanto, un incremento de las emisiones de GEI.

Pasados 30 años de su puesta en servicio, ya están en marcha los trabajos de renovación integral de la línea de Alta Velocidad Madrid – Sevilla, dirigidos a acondicionar viaductos y túneles, así como elementos de superestructura, instalaciones de señalización y telecomunicaciones y otras instalaciones. A partir de 2033, el resto de las líneas irán cumpliendo 30 años desde su puesta en servicio, y requerirán nuevas emisiones durante las siguientes décadas. La adecuada cuantificación y optimización de estas redundará en un menor impacto climático de la red de AV.

RED DE ALTA VELOCIDAD (KMS) QUE CUMPLE 30 AÑOS DESDE PUESTA EN SERVICIO



Fuente: elaboración propia



Etapas de desmantelamiento

El ciclo de vida finaliza con la etapa de desmantelamiento de la infraestructura en la que la generación de emisiones iría asociada principalmente al movimiento de maquinaria necesaria para la retirada, el transporte y tratamiento de los residuos generados. La herramienta Carbontrack360, por el momento, deja fuera las emisiones generadas en estas dos etapas, pero sin duda es un campo en el que profundizar en el futuro.

Los vehículos ferroviarios siguen aproximadamente las mismas etapas ya mencionadas. La

fabricación del material rodante genera emisiones debido a la producción de materiales como el acero, el aluminio y otros componentes, así como a la energía utilizada en el proceso de fabricación. Igualmente, su mantenimiento durante la etapa operativa y su posterior renovación y desguace también generan emisiones. Estas emisiones son reducidas en comparación con las emisiones vinculadas a la infraestructura, y por el momento no están recogidas en la herramienta Carbontrack360.

El modo ferroviario debe incrementar los esfuerzos en la eficiencia y mejora en la construcción potenciando una construcción baja en carbono, especialmente en la fase de selección y utilización de materiales ecológicos, que es donde más emisiones de GEI se generan. A pesar de que la baja o nula emisión de CO2 durante su operación permite hacer un balance más sostenible del modo ferroviario, en las etapas de construcción y de renovación, tiene todavía un importante margen de mejora para las emisiones globales y hacer más sostenible este modo de transporte a lo largo de todo el ciclo de vida.

EMISIONES EN EL MODO AÉREO

Cuando se habla del impacto climático del transporte aéreo, lo habitual es centrarse en las emisiones que se producen durante la operación. Y con razón: esa etapa representa, con mucha diferencia, la mayor parte del total. Sin embargo, si queremos comparar el avión con otros modos de transporte de forma neutral, es importante tener en cuenta también las emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de las infraestructuras aeroportuarias. Al hacerlo, se confirma que el grueso del impacto sigue estando en la operación, pero se gana en coherencia y en capacidad de análisis comparativo.

Así, debido a las características y dimensiones de las infraestructuras aeroportuarias, la **etapa de construcción** supone un porcentaje de emisiones inferior al 5 % del total en el ciclo de vida completo.

Las emisiones de la **etapa de operación** del transporte aéreo nacional representaron en España un 1,2 % del total de las emisiones en el año 2023 y desde el año 2005 estas emisiones se han reducido un -18,2 %. En Europa, las emisiones del transporte aéreo nacional de cada país representaron un 0,42 % del total de las emisiones en 2023 (un porcentaje menor que en España) y se

redujeron, de manera similar, un -20,2 % desde 2005³. Esta diferencia se debe principalmente a la extensión territorial de España y la existencia de dos archipiélagos que dependen en gran medida del transporte aéreo.

En este sentido, es importante destacar que, de acuerdo a las normas establecidas en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), las emisiones del transporte internacional no se asignan al total de las emisiones nacionales y se reporta aparte (pro memoria) debido al carácter transfronterizo del transporte aéreo internacional y para evitar el doble conteo.

Actualmente, se están desarrollando algunas acciones que contribuirán de manera significativa a la reducción de las emisiones en la fase de operación:

El uso de combustibles de aviación sostenibles reducirá las emisiones a medio y largo plazo.

En septiembre de 2023 el Parlamento Europeo aprobó la iniciativa RefuelEU⁴ cuyo principal objetivo es impulsar el uso de combustibles sostenibles de aviación (SAF por sus siglas en inglés), entre los que se incluyen los combustibles de aviación sintéticos, los biocombustibles⁵ y los de carbono reciclados, que sustituyen a los combustibles convencionales, son plenamente miscibles con ellos, y son compatibles con los motores de aeronaves existentes.

Es importante aclarar que los SAF liberan CO₂ durante su combustión; sin embargo, este carbono proviene de fuentes renovables (biomasa, residuos orgánicos, CO₂ capturado, aceites usados, etc.) y por tanto fue previamente absorbido del ambiente durante el crecimiento de las plantas o la producción de la materia prima. En general, las emisiones netas GEI se reducen entre el 50 % y el 80 % en comparación con combustibles tradicionales, según el tipo de SAF y su proceso de producción.

TIPOLOGÍA DE COMBUSTIBLES DE AVIACIÓN SOSTENIBLE (SAF)



COMBUSTIBLE DE AVIACIÓN SINTÉTICO

Combustibles líquidos o gaseosos distintos de los biocombustibles y el biogás, y cuyo contenido energético procede de fuentes renovables distintas de la biomasa.



BIOCOMBUSTIBLES

Producidos a partir de aceite de cocina usado o grasas animales.



BIOCARBURANTES AVANZADOS

Producidos a partir de otras materias primas como algas, biomasa, biorresiduos, y otros.



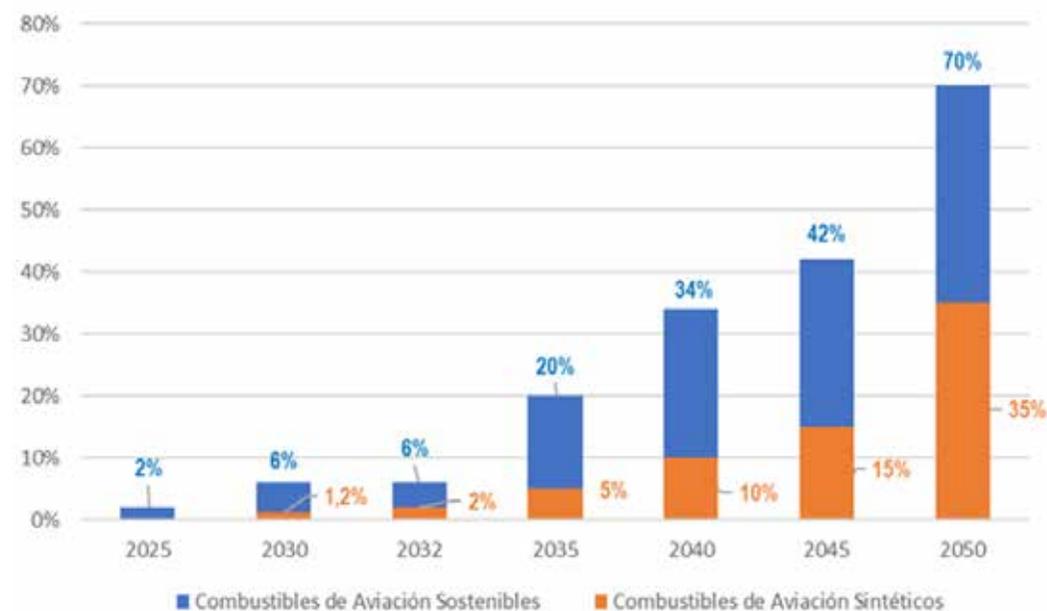
COMBUSTIBLES DE AVIACIÓN DE CARBONO RECICLADO

Producidos a partir de flujos de residuos líquidos o sólidos de origen no renovable que no son adecuados para la valorización de materiales o a partir de gases residuales de origen no renovable producidos como consecuencia inevitable e involuntaria en instalaciones industriales.

Fuente: ReFuelEU Aviation y Directiva 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.

El Reglamento de aviación ReFuelEU establece obligaciones a escala de la UE para los proveedores de combustible de aviación, los operadores aéreos y los aeropuertos para aumentar el SAF utilizado en los vuelos que salen de los aeropuertos por encima de determinados umbrales de tráfico (800.000 pax/año o 100.000 t/año). Concretamente, a partir de 2025, los proveedores de combustible de aviación deben suministrar una mezcla mínima del 2 % de SAF con combustibles convencionales a los aeropuertos de la Unión, que aumentará gradualmente hasta alcanzar al menos el 70 % en 2050 y la cuota de los combustibles sintéticos de aviación pasará de un 1,2 % en 2030, hasta el 35 % en 2050.

PORCENTAJE DE COMBUSTIBLES DE AVIACIÓN SOSTENIBLES MÍNIMOS QUE DEBEN ESTAR DISPONIBLES EN LOS AEROPUERTOS DE LA UNIÓN EUROPEA



Fuente: ReFuelEU Aviation y Directiva 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.

En total, según la EASA⁶, el cumplimiento del mandato de suministro de combustibles sostenibles de aviación bajo ReFuelEU Aviation podría reducir las emisiones netas de CO₂ en al menos 65 millones de toneladas (47 %) en 2050.

Pero el reto no está solo en su distribución, sino en su producción. En 2023, en España se produjeron 25.221 m³ de SAF para la aviación, según las estadísticas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico⁷, lo que supone un 0,3% del total de los combustibles de aviación consumidos, según estadísticas de CORES; y a nivel mundial, en 2024, la producción de SAF representó el 0,53 % del uso de combustible para aviones. Es necesario una expansión significativa de la capacidad de producción para cumplir con los mandatos y objetivos futuros ya que, aunque actualmente se podrían suministrar los 4,1 millones de m³ de SAF requeridos en el marco de ReFuelEU Aviation en 2030, sería necesario aumentarla rápidamente a partir de entonces.

Existe claramente un recorrido de mejora en la producción de SAF, en la que España tiene un gran potencial de liderazgo debido a varios factores,

como su abundancia de recursos naturales, su capacidad tecnológica y su compromiso con la sostenibilidad y la energía renovable. En las primeras etapas de este desarrollo, el impulso del sector público podría ser decisivo para consolidar una industria nacional competitiva, acelerar la implantación de capacidades productivas y posicionar a España como un referente europeo en la producción de combustibles sostenibles para la aviación.

La gestión del tráfico aéreo y el uso de nueva tecnología también contribuirán, aunque en menor medida, a la reducción de emisiones.

La mejora de la eficiencia del tráfico aéreo a través de la optimización de su gestión puede contribuir a reducir la distancia de las rutas, las demoras y tiempos de espera en el aire y, por tanto, el consumo de combustibles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

En 2024 se aprobó el nuevo Reglamento del Cielo Único Europeo (SES2+)⁸ con el objetivo de reforzar las normas de seguridad del tránsito aéreo,

contribuir al desarrollo sostenible del sistema de transporte aéreo y mejorar el rendimiento global de la gestión del tránsito aéreo y de los servicios de navegación aérea para el tránsito aéreo general en Europa. Es decir, establece un marco legal que promueve una gestión del espacio aéreo más eficiente y sostenible.

En este sentido, el Plan Maestro de Gestión del Tráfico⁹ será una herramienta clave en la descarbonización del transporte aéreo y se estima que podría ahorrar hasta 400 millones de toneladas de CO₂ de aquí a 2050.

En el año 2017 la OACI aprobó una nueva norma en la que se establecían límites máximos de emisiones de CO₂ por unidad de trabajo (como por pasajero-kilómetro) para aeronaves nuevas lo que supone fomentar el diseño y uso de aviones más eficientes en consumo de combustible, lo que a su vez reduce directamente las emisiones de CO₂. Esta norma entró en vigor en el año 2020 para el diseño de las nuevas aeronaves y a partir de 2028 será obligatoria para aeronaves en producción. Se espera que genere una reducción

promedio del 4 % en el consumo de combustible durante el crucero de las nuevas aeronaves.

Estas mejoras tecnológicas y de gestión del espacio aéreo se desarrollarán e implantarán a lo largo de las próximas décadas. El régimen de comercio de derechos de emisión (RCDE, o ETS por sus siglas en inglés) servirá de palanca para su implementación y, a la vez, estabilizará las emisiones de operación aérea a corto plazo.

Desde 2013, la aviación está sujeta al sistema de comercio de derechos de emisiones (RCDE-UE) ¹⁰, que se rige por el principio de que “quien contamina paga”. Las aerolíneas deben entregar derechos de emisión para cubrir sus emisiones, si bien disponían de derechos de emisión gratuitos. Una de las claves de la reforma propuesta en el paquete legislativo Fit for 55 es que estos derechos irán siendo eliminados gradualmente desde 2026 hasta 2034 y, además, se impondrá un límite de emisiones de la aviación.

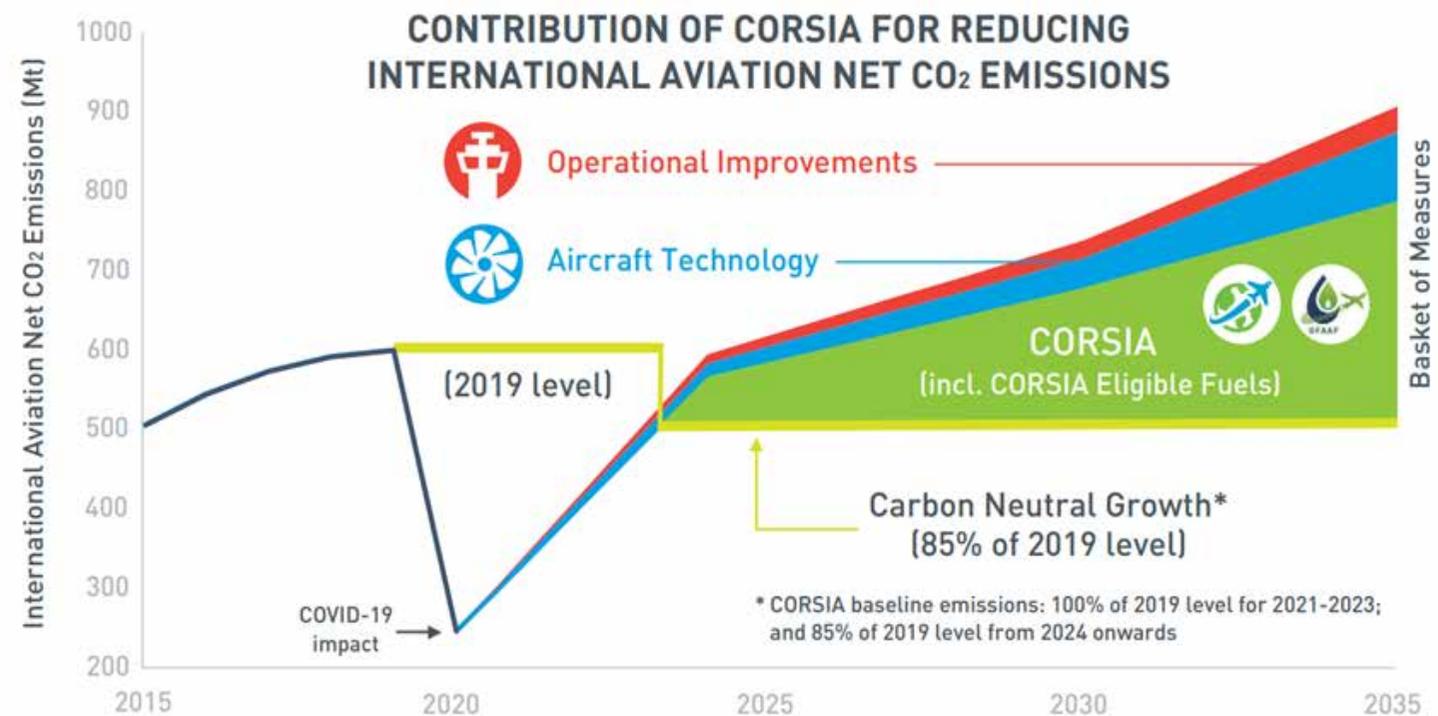
Durante el período 2013-2023, el RCDE-UE supuso una reducción neta de las emisiones de CO2 en la aviación de 206 millones de toneladas mediante

la financiación de reducciones de emisiones en otros sectores, de las cuales 47 millones de toneladas fueron en el período 2021-2023¹¹. Esto representó un 35 % del total de las emisiones de CO2 reducidas en ese período en el marco de la RCDE-UE.

Este sistema sólo se aplica a los vuelos de dentro del Espacio Económico Europeo (EEE). Sin embargo, para limitar las emisiones de GEI procedentes del transporte aéreo internacional, la OACI ha desarrollado el Plan de Compensación y Reducción del Carbono para la Aviación Internacional (CORSA). Su objetivo principal es estabilizar las emisiones CO2 del sector aéreo a partir de los niveles de 2020, a través de la compensación de emisiones que excedan un determinado umbral. El esquema se implementa en fases: una fase piloto (2021-2023), una fase voluntaria inicial (2024-2026) y una fase obligatoria a partir de 2027 para la mayoría de los países (fig. pág. siguiente).

Las etapas de explotación y de mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria, así como las etapas de renovación y, en su caso, desmantelamiento tienen una importancia reducida comparadas con la operación del modo aéreo. Así mismo, la fabricación, mantenimiento y desguace de las aeronaves son muy minoritarias frente al total del ciclo de vida en este modo, y no han sido por el momento incluidas en la herramienta Carbontrack360.

Como conclusión general sobre las emisiones del transporte aéreo se puede destacar que existen numerosas iniciativas desde las administraciones públicas internacionales y europeas para reducir las emisiones en la fase de operación del transporte aéreo y todas ellas contribuirán a reducir el impacto que tiene este sector en las emisiones de gases de efecto invernadero.



CARBONTRACK360. MOTIVACIÓN Y SUPUESTOS

CarbonTrack360 pretende ser una herramienta para la reflexión, que permita visualizar el impacto en emisiones de GEI en el modo aéreo y la alta velocidad ferroviaria en las distintas etapas de desarrollo y operación de las infraestructuras y los servicios de transporte.

El modo aéreo, por el momento con mayores emisiones en operación frente a otros modos, tiene sin embargo un menor impacto en la fase de construcción. La alta velocidad ferroviaria, con emisiones nulas en fase de operación desde 2019, tiene por el contrario elevadas emisiones en la fase de construcción. Ambos modos han sido competidores, especialmente en el ámbito

peninsular, como modos de transporte colectivo con prestaciones similares y enfocados a tipologías similares de viajes y viajeros, lo que hace la comparación más relevante.

Se ha dejado fuera del ejercicio a la carretera, pese a ser el modo que contribuye con mayores emisiones de GEI, puesto que sus infraestructuras constituyen un capital básico de accesibilidad y cohesión territorial que no pueden ponerse en la misma balanza. En cualquier caso, puede ser interesante en el futuro añadir este modo a la comparación para encontrar lecciones aprendidas y ámbitos de mejora.

El análisis del ciclo de vida completo de las infraestructuras de transporte es un extenso campo en evolución y profundización, con numerosas publicaciones académicas recientes. Este ejercicio no pretende avanzar más en ese conocimiento, ni sustituirlo, sino, al contrario, simplificarlo, contribuir a su divulgación y generalizar la reflexión en estos términos en el ámbito de las emisiones de GEI.

Por eso, CarbonTrack360 se construye sobre valores y parámetros concretos, extraídos de fuentes disponibles, con el objetivo de realizar estimaciones de la evolución de la acumulación de emisiones en diferentes escenarios.

La primera fase, que no genera emisiones de manera directa, pero es fundamental para tomar las mejores decisiones desde el inicio, es la Planificación y diseño, en la que se identifican las necesidades de transporte, se realizan estudios de viabilidad y se diseña técnicamente la infraestructura. Es crucial considerar los impactos ambientales y sociales desde el inicio para minimizar efectos negativos futuros.

Simulador y casos reales

CarbonTrack360 permite simular un caso genérico de conexión entre dos puntos, introduciendo una serie de aspectos sobre la demanda, el reparto modal y las infraestructuras previstas (tamaño de aeropuertos, tipo de terreno, distancias).

La herramienta permite también la reflexión sobre casos reales: la evolución durante los últimos 35 años, desde el inicio de la construcción del AVE Madrid-Sevilla, de la red de aeropuertos e infraestructuras ferroviarias de Alta Velocidad, o determinados corredores característicos de nuestro sistema de transporte.

Etapas y actividades incluidas en la herramienta

La herramienta incluye las etapas de construcción y mantenimiento de las infraestructuras, y la operación de los servicios de transporte.

No se han tenido en consideración, por falta de información contrastada, las emisiones generadas en las etapas de renovación y desmantelamiento de las infraestructuras, pese a que la vida

útil de algunos de los subsistemas entraría en el rango temporal planteado.

Tampoco se han incluido por el momento las actividades relacionadas con los vehículos (material rodante ferroviario y aeronaves) en su fabricación, mantenimiento y desguace.

Son campos en los que se podría profundizar en el futuro, mejorando y completando las evaluaciones que se realicen.

Parámetros

El análisis se apoya en buena medida en el Informe Técnico realizado por la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Recomendaciones para la estimación de las emisiones de GEI en la evaluación ambiental de planes y proyectos de transporte, de 2015, a partir de este punto, Recomendaciones MITERD. Pese a no ser reciente, es una fuente contrastada y transversal, que abarca los distintos modos y etapas, lo que garantiza la pertinencia de la comparación.

Para el análisis las emisiones de GEI en la etapa de operación del modo aéreo, se toman las emisiones medias obtenidas a partir de la calculadora ICAO Carbon Emissions Calculator (ICEC)¹², las distancias registradas de las bases de datos de EUROCONTROL, y la demanda aérea en cada relación peninsular desde 1989 a 2024 de los anuarios estadísticos y de los registros de Aena. El resultado ponderado es una emisión media de 124 g CO₂/pax·km, o 71 kg CO₂/pax·trayecto.

En el modo ferroviario, Adif Alta Velocidad cuenta desde 2019 con contratos de suministro de energía GdO renovable para el sistema ferroviario. Por tanto, a partir de ese año las emisiones por operación ferroviaria de alta velocidad se consideran nulas. Para años anteriores, se toman los factores de emisión medios de las Recomendaciones MITERD para 2020 de los que, para igualar el análisis con el modo aéreo, se sustraen las emisiones asociadas a la fabricación y desguace de los vehículos, y otras emisiones de uso distinto de la tracción. El resultado es un factor de emisión hasta 2019, de 20,68 g CO₂e/viaj·km, a partir de entonces, nulo.

Para las emisiones de GEI de la construcción de infraestructura aeroportuaria y su mantenimiento y operación, se toman los parámetros establecidos en las Recomendaciones MITERD, realizando algunos supuestos sobre estas.

En el caso de la construcción de la infraestructura ferroviaria de Alta Velocidad, las emisiones están fuertemente ligadas a los movimientos de tierras en la construcción y al aporte de materiales para estructuras y túneles. Esto las hace muy sensibles a la orografía sobre la que se construya la infraestructura, por lo que las Recomendaciones MITERD aportan un rango muy amplio para las emisiones por kilómetro de infraestructura, desde las 4.000 t CO₂/km para terreno llano, a las 24.000 para terreno accidentado.

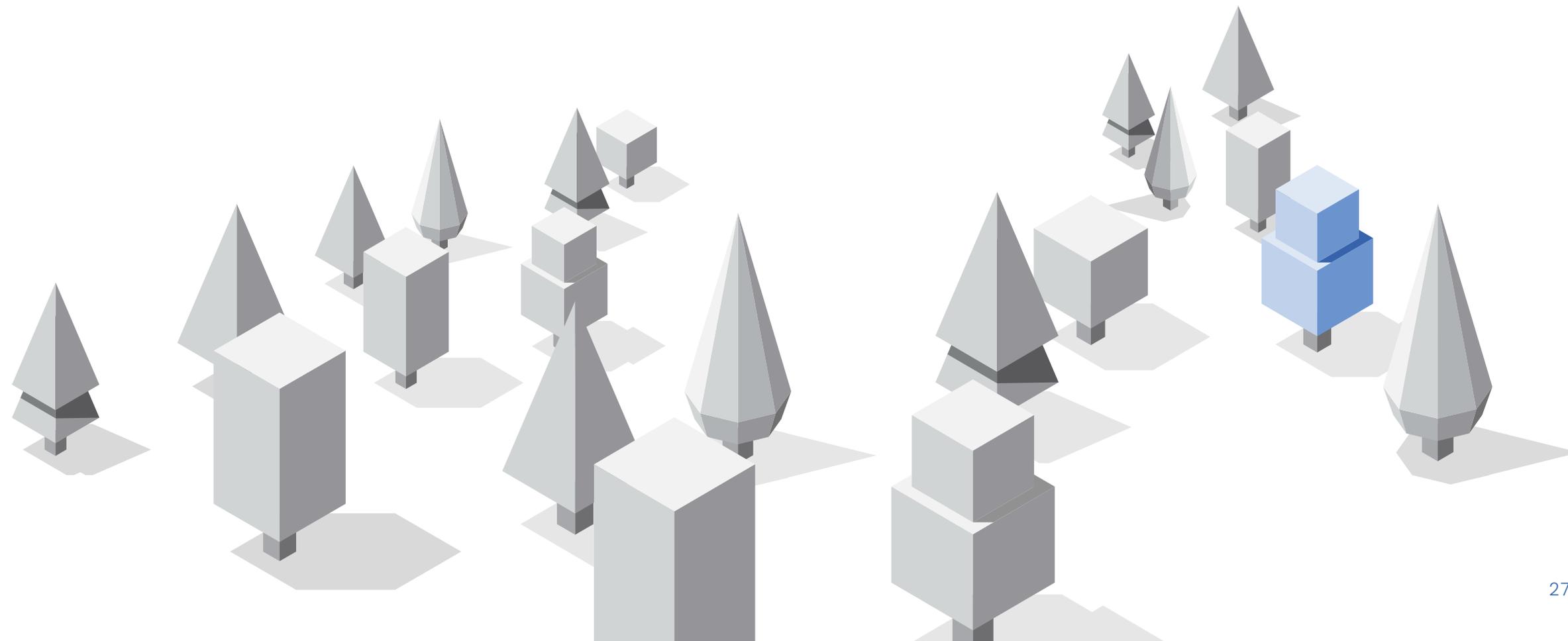
Para la estimación de las emisiones en la construcción de red de alta velocidad en las últimas décadas, se ha tomado el coste de construcción por kilómetro de cada línea como un indicador de la accidentalidad del terreno.

Las emisiones de mantenimiento de la infraestructura de Alta Velocidad se toman también de las Recomendaciones MITERD.

Otras consideraciones

La relación existente entre la infraestructura y los volúmenes de demanda es un tema que no está cerrado y por lo tanto la calculadora establece algunos supuestos y también permite que el usuario los modifique. No se establecen sin embargo límites a la demanda que podría ser manejada en un aeropuerto en función de su tamaño, ni a la demanda que podría transportarse en una línea de alta velocidad.

CarbonTrack360 no pretende cerrar el debate, sino enriquecerlo y hacerlo más operativo, ofreciendo una comparación neutral entre modos de transporte muy distintos en su desarrollo y funcionamiento. A continuación, se presentan algunos ejercicios basados en la calculadora que arrojan resultados concretos y permiten extraer conclusiones relevantes.



IDENTIFICAR LAS CLAVES DE LA EFICIENCIA CLIMÁTICA

La demanda, factor clave de la eficiencia en emisiones.

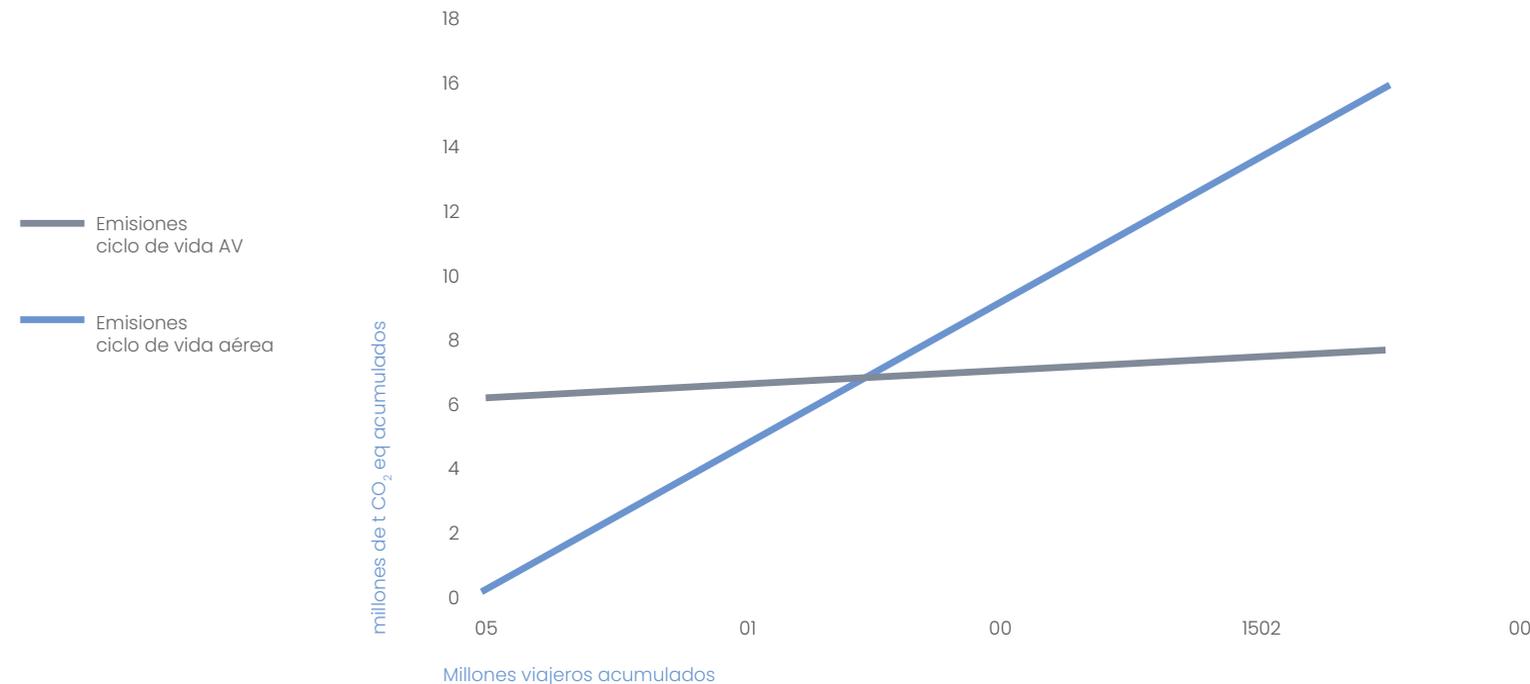
Como ejemplo, se toma el caso genérico de la conexión entre dos puntos distantes - 600 km -, y se supone, por una parte, la construcción de dos aeropuertos, uno "grande" y uno "mediano", y por otra, la de una línea ferroviaria de alta velocidad entre ambos puntos, siendo el terreno entre ellos de accidentalidad media.

Las emisiones acumuladas por la construcción del modo ferroviario serían algo superiores a los 6 millones de toneladas de CO₂e, mientras que las atribuibles a esta relación por la construcción de los aeropuertos no llegarían a las 150.000 toneladas. Sin embargo, en la etapa de operación, mantenimiento y explotación, las emisiones del ferroviario se estabilizan, con un ligero incremento debido al mantenimiento anual de la infraestructura, mientras que las del modo aéreo son propor-

cionales al número de pasajeros (y por tanto, de vuelos).

El punto en que las líneas de emisiones acumuladas del modo ferroviario y del modo aéreo se cortan, representa el umbral de eficiencia, a partir del cual las emisiones generadas en la construcción de la línea de Alta Velocidad más las emisiones de su mantenimiento serían inferiores a las que se habrían generado por la construcción de los aeropuertos y la operación los vuelos necesarios para transportar un número X de pasajeros, en este caso, 74 millones (fig. pág. siguiente).

EMISIONES DE GEI ACUMULADAS SEGÚN DEMANDA ACUMULADA



Fuente: elaboración propia

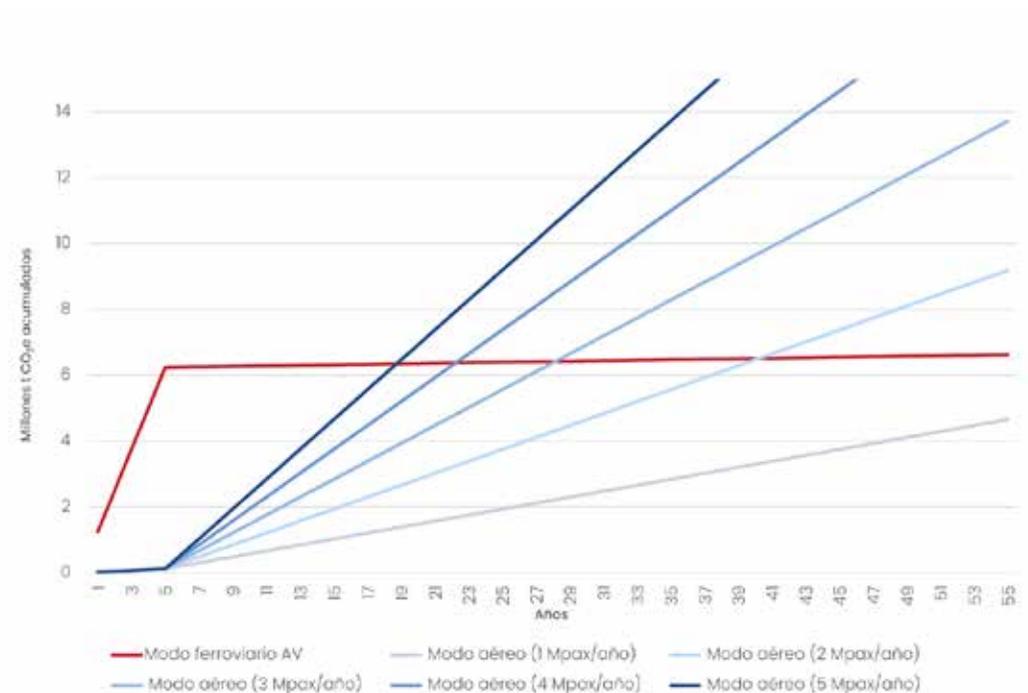
Al poner este razonamiento en perspectiva temporal, se observa cómo la eficiencia climática de cada modo depende de la demanda anual del mismo. Mientras que, para 1 millón de pasajeros al año, el modo aéreo acumularía menos emisiones que el ferroviario incluso en 50 años de operación, para 5 millones de pasajeros al año, superaría en 14 años de operación las emisiones generadas por la construcción de la infraestructura ferroviaria (fig. a la derecha).

Un umbral de eficiencia estable frente a la distancia, pero no frente al tipo de terreno.

La distancia es un factor que juega en contra de ambos modos cuando se considera el ciclo de vida: en el modo aéreo, porque se incrementa la distancia de trayecto y por tanto las emisiones de GEI de cada vuelo. En el modo ferroviario, porque se incrementan las emisiones de GEI por la construcción de la infraestructura.

Este doble efecto lleva a obtener umbrales de eficiencia (número de viajeros acumulados a partir de los cuales las emisiones del modo aéreo

UMBRAL DE EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y TIPO DE TERRENO



Fuente: elaboración propia

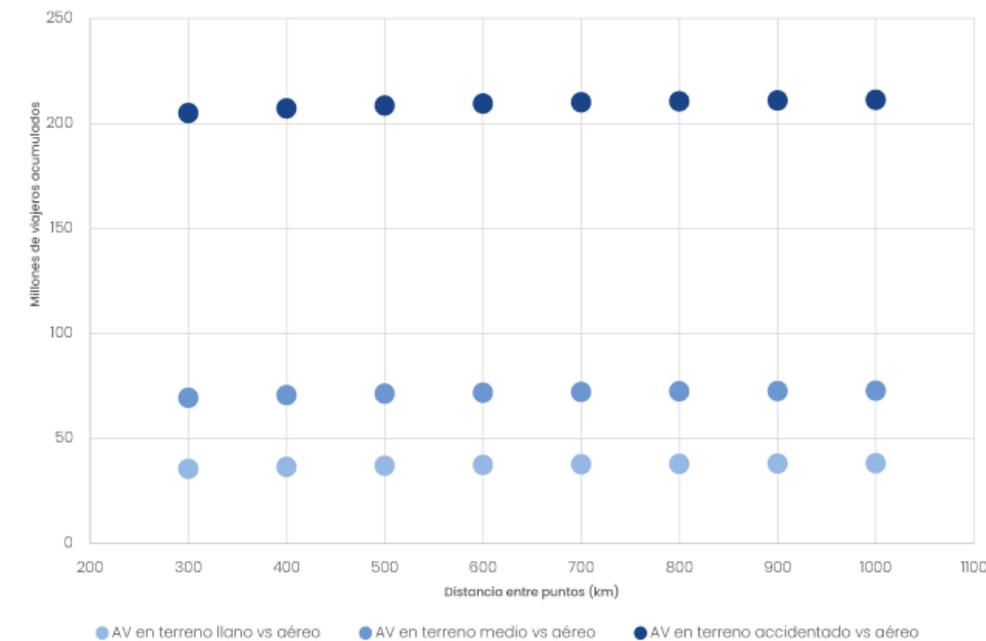
superarían a las del modo ferroviario) similares en relaciones de muy diferentes distancias.

El tipo de terreno sí es determinante en este umbral de eficiencia. En el ejemplo que se analiza, si el terreno sobre el que se construye la línea ferroviaria fuera llano, estas emisiones serían equivalentes a transportar unos 40 M pax en el modo aéreo. En el caso de terreno accidentado, equivaldrían a transportar más de 200 M pax. Esto se debe a la gran diferencia en las emisiones de GEI de la construcción de infraestructuras de Alta Velocidad ferroviaria según el tipo de terreno, dada la relación 6:1 entre las emisiones de construcción en terreno accidentado frente a llano (fig. siguiente).

El foco de atención: la operación del modo aéreo y la construcción del ferroviario.

En un periodo de 50 años de operación, con una demanda de 1 millón de pasajeros anuales, las emisiones acumuladas de GEI generadas por el modo aéreo se deberían en un 95 % a la opera-

UMBRAL DE EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA Y TIPO DE TERRENO



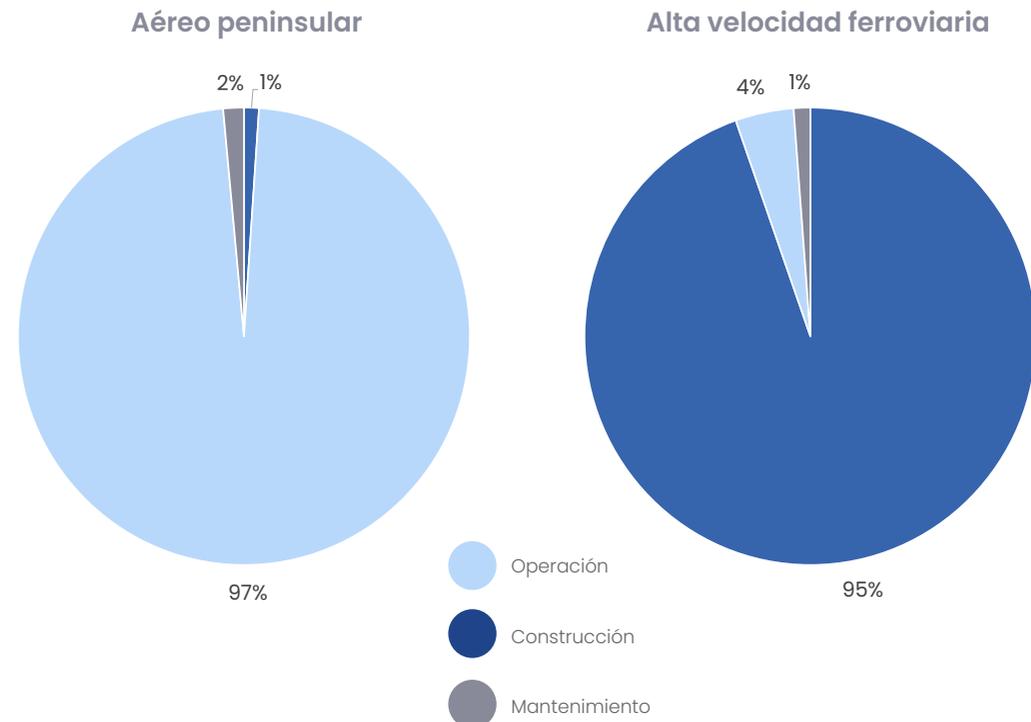
Fuente: elaboración propia

ción, frente a un 3 % de la construcción y un 2 % del mantenimiento. En el caso de la Alta Velocidad ferroviaria, por el contrario, la construcción habría generado el 94 % de las emisiones de GEI. Este análisis por el momento no cubre las etapas de renovación y desmantelamiento, ni las emisiones asociadas a la fabricación, mantenimiento y desguace de vehículos, pero la rotundidad de la comparación permite extraer conclusiones claras.

Es evidente que el modo aéreo debe centrar sus esfuerzos en la reducción de las emisiones en la etapa de operación, pues tendrán un mayor impacto en la eficiencia total del sistema. La importancia de las emisiones de la etapa de construcción o del mantenimiento de aeropuertos es muy pequeña tanto frente a la operación del propio modo aéreo como frente a la construcción ferroviaria.

En el modo ferroviario, considerando que la etapa de operación no genera emisiones (por los contratos de energía con GdO renovable), el foco ha de ponerse en la construcción, y la optimización de sus emisiones. (fig. a a derecha)

REPARTO DE EMISIONES ACUMULADAS POR FASE EN CADA MODO



Fuente: Elaboración propia.

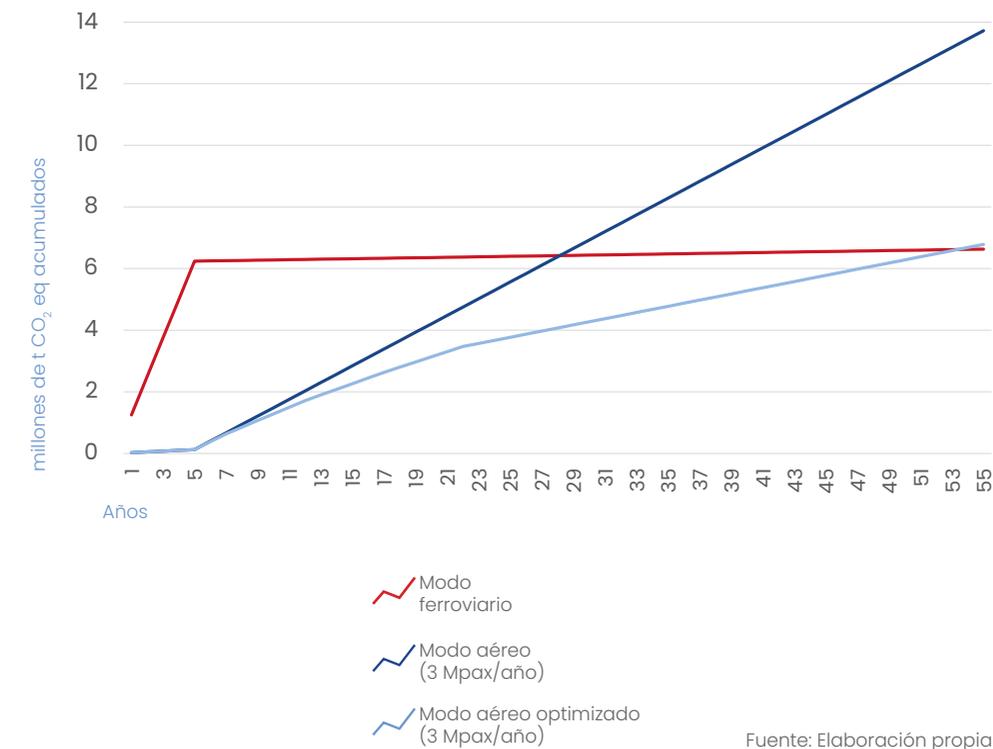
La reducción de emisiones en la operación aérea transformará la comparación entre modos.

El sector aéreo lleva años trabajando en la reducción de sus emisiones de operación, mejorando los combustibles, la gestión del espacio aéreo y las propias aeronaves, y aún tiene recorrido en las próximas décadas. Las diferentes propuestas incluidas en el programa Fit for 55 para reducir las emisiones de GEI en la UE podrían reducir hasta un 63% las emisiones de GEI por unidad de transporte, en diferentes escalones.

Tomando el ejemplo antes analizado, puede verse cómo, para una demanda anual de 3 millones de pasajeros anuales, con las tasas de emisiones GEI actuales, el modo aéreo, a partir del año 22 de operación habría emitido más que el ferroviario. Si consideramos los escalones de reducción de emisiones previstos en Fit for 55, esto se produciría en 50 años de operación.

El modo aéreo tiene la oportunidad de transformar su impacto climático y mejorar su posicionamiento frente a otros modos (fig. siguiente).

EMISIONES GEI ACUMULADAS EN MODO FERROVIARIO, AÉREO Y AÉREO OPTIMIZADO



Fuente: Elaboración propia.

UNA VISIÓN DE LA RED ESPAÑOLA

Del conjunto de la red

En las últimas tres décadas, España ha experimentado un impresionante proceso de modernización de sus infraestructuras de transporte. La inauguración de **terminales aeroportuarias estratégicas** junto con el desarrollo de la **alta velocidad ferroviaria** ha consolidado una red moderna que inició su transformación con la construcción de la red de autopistas que comenzó en la década de 1980.

Esta transformación ha generado múltiples beneficios, pero también plantea nuevos retos en términos de sostenibilidad. Comprender su impacto desde una perspectiva amplia y rigurosa

es fundamental para diseñar estrategias efectivas hacia un futuro de transporte verdaderamente sostenible.

Este análisis se centra en las emisiones de GEI generadas específicamente por el **transporte aéreo peninsular y la alta velocidad ferroviaria**, dejando al margen otros modos de transporte y segmentos de actividad para obtener resultados más precisos y comparables.

En el caso del **transporte aéreo**, se incluye todo el tráfico peninsular, independientemente de la existencia de conexiones alternativas de alta velocidad (estos pares representan el 63 % de la demanda peninsular). No se consideran las

emisiones derivadas del transporte aéreo extra-peninsular e internacional, ya que no son sustituibles por el ferrocarril y, sin embargo, constituyen la mayor parte del tráfico aéreo en España.

En el caso del transporte ferroviario, no se han incluido otros usos de la red construida, como los servicios de Media Distancia AVANT (24 % de los viajeros que usaron la red AV en 2023) o servicios Alvia, Altaria y Euromed (14 %).

Además, el estudio no contempla la fase de **renovación de infraestructuras o su desmantelamiento tras la vida útil** de sus elementos, debido a la falta de información contrastada. Este aspecto es especialmente relevante en el caso de la Alta Velocidad, donde la construcción supone un porcentaje muy elevado de las emisiones totales. Tampoco se han considerado componentes como la **fabricación, mantenimiento y desmantelamiento de vehículos**, lo cual también influye en el impacto global.

Por lo tanto, este ejercicio no pretende ofrecer una comparación exhaustiva o un juicio absoluto sobre políticas pasadas o presentes. Más bien, busca

aportar claridad sobre los **órdenes de magnitud entre modos de transporte y desmitificar ideas preconcebidas**, facilitando un debate más informado y riguroso hacia un futuro de transporte más sostenible.

Desde 1989, en España se han construido y ampliado terminales aeroportuarias clave como **Madrid (1998 y 2006), Barcelona (2004 y 2009) y Málaga (2010 y 2012)**. En total, se han levantado **2,4 millones de m² de terminales y 9,2 millones de m² de pistas**. Esas ampliaciones han dado servicio al total del tráfico aéreo, y se asigna al tráfico peninsular el 11,5%¹⁹ de las emisiones derivadas de la construcción.

Por otro lado, el despliegue de la **alta velocidad ferroviaria** ha supuesto cerca de **4.000 km de líneas puestas en servicio** en el mismo periodo, sobre las que se han hecho hipótesis simplificadas de la distribución en el tiempo de las emisiones de GEI por su construcción. Además, se contabilizan las emisiones de mantenimiento que se suman a medida que se ponen en servicio los tramos.

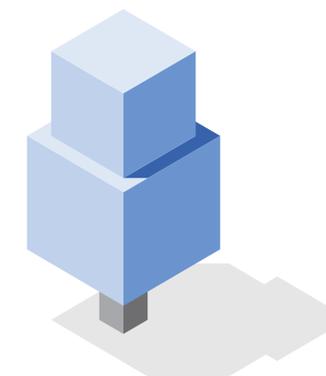
Como resultado, durante estas tres décadas, el transporte aéreo peninsular ha generado **45 Mt CO₂e**, mientras que la alta velocidad ferroviaria ha emitido **50 Mt CO₂e**. Las emisiones ferroviarias tienden a estabilizarse en los últimos años debido a la finalización de importantes proyectos y al uso exclusivo de energía renovable desde 2019.

Este análisis muestra la importancia de considerar **todo el ciclo de vida de las infraestructuras** y no solo la fase operativa, para comprender realmente el impacto climático de cada modo de transporte.

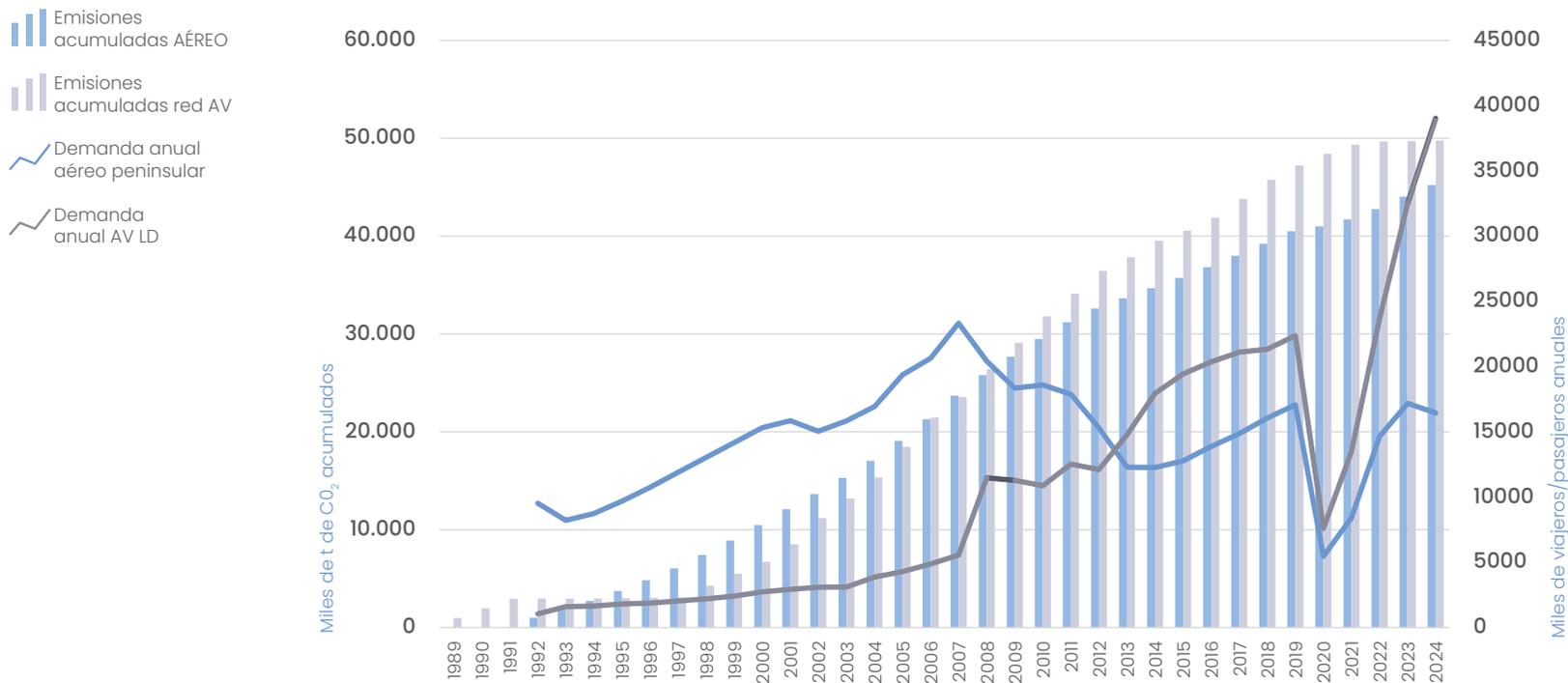
En este periodo la demanda en este segmento de viajes peninsulares de larga distancia ha experimentado un fuerte crecimiento (+ 162 %), además de un cambio de tendencia significativo, a medida que se extendía la red de alta velocidad, e impulsado por la liberalización de servicios ferroviarios en los últimos años. En 2024 la demanda de Alta Velocidad Larga Distancia rozó los 40 millones de viajeros, frente a 16 millones de pasajeros para el transporte aéreo peninsular, que no ha superado el nivel alcanzado en 2007 y presenta desde entonces una tendencia decreciente.

La construcción de la red de Alta Velocidad ha supuesto un importante esfuerzo en inversiones y en emisiones. Sin embargo, el éxito en demanda supone que las emisiones acumuladas por cada viajero de alta velocidad se hayan reducido drásticamente en los últimos años, hasta llegar en 2024, a 139 kg CO₂e por viajero acumulado.

El modo aéreo ya ha conseguido importantes reducciones en sus emisiones de GEI derivadas de las mejoras de aeronaves y motores, lo que supone alcanzar unas emisiones de 94 kg CO₂e por pasajero acumulado (fig. siguiente).



EMISIONES ACUMULADAS POR EL TRANSPORTE AÉREO PENINSULAR VS RED DE ALTA VELOCIDAD



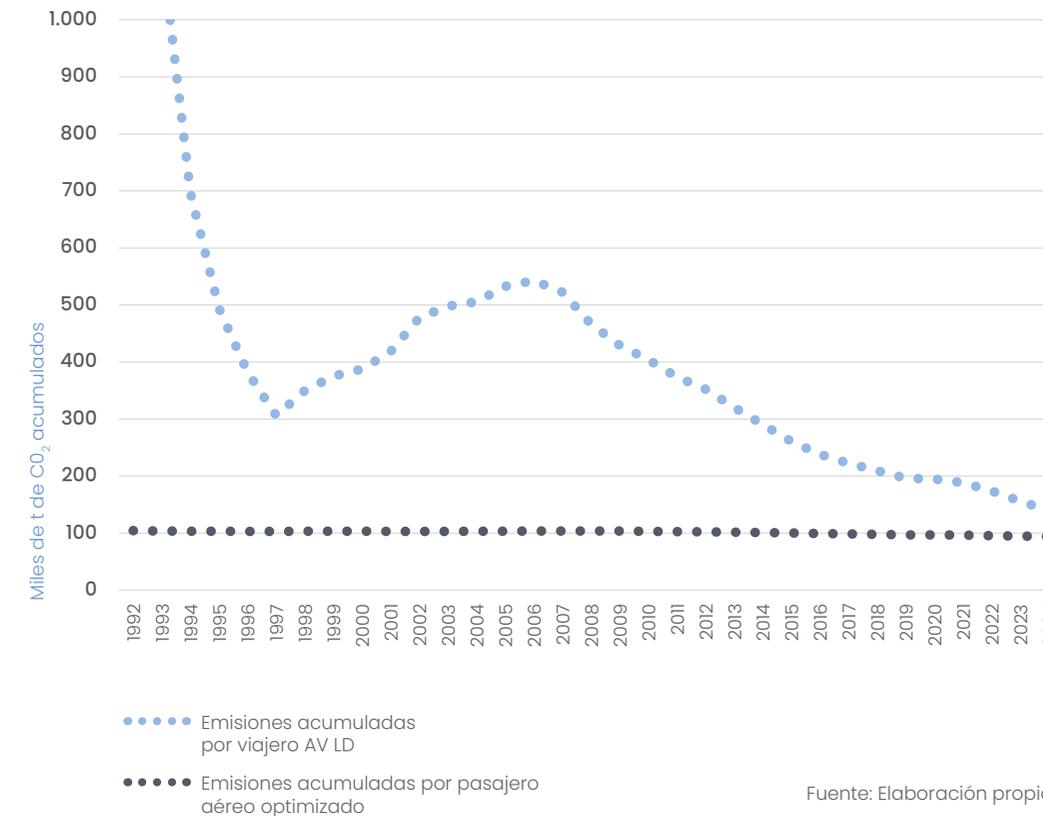
Fuente: Elaboración propia.

El modo aéreo ya ha conseguido importantes reducciones en sus emisiones de GEI derivadas de las mejoras de aeronaves y motores, lo que supone alcanzar unas emisiones de 94 kg CO₂e por pasajero acumulado.

Este gráfico (fig. siguiente) permite apreciar el diferente perfil temporal de las emisiones en ambos modos. El ferrocarril emite prácticamente la totalidad de las emisiones al principio, y las debe “amortizar” con el tiempo, mientras que el modo aéreo las emite a medida que se producen los vuelos.

Un resultado clave del análisis es que las emisiones de cada modo de transporte se generan en fases muy distintas. En el caso del **transporte aéreo, el 97% de las emisiones** provienen de la fase de operación, mientras que, en la **alta velocidad ferroviaria, un abrumador 95% de las emisiones** corresponden a la construcción de infraestructuras.

EMISIONES ACUMULADAS POR PASAJERO/VIAJERO ACUMULADO EN CADA MODO

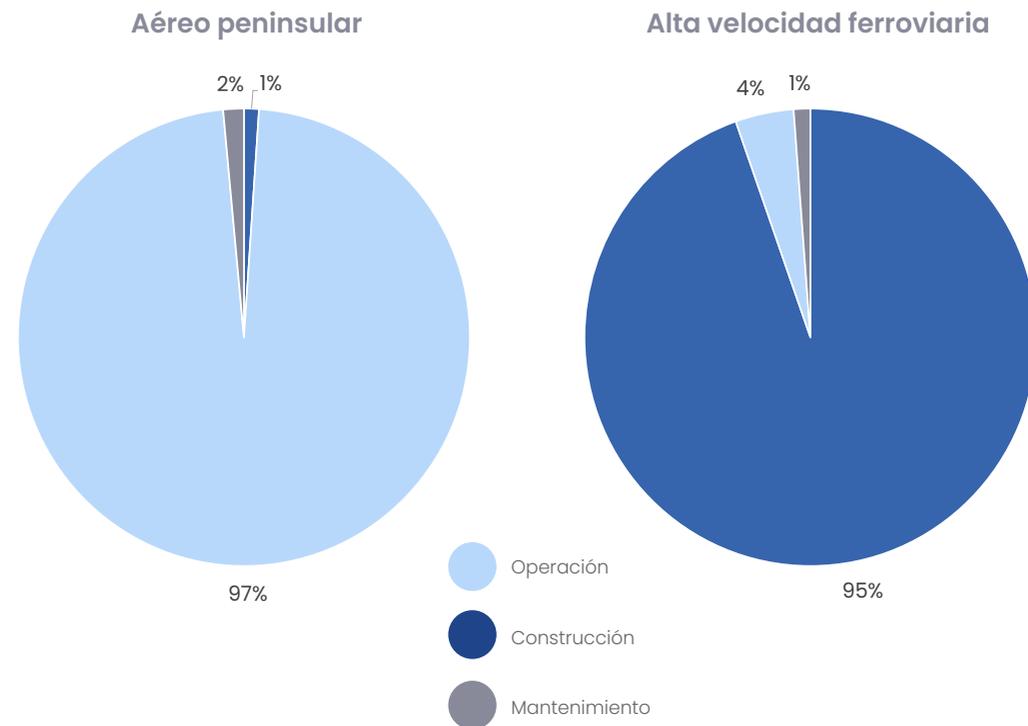


Fuente: Elaboración propia.

Este dato es revelador porque muestra claramente **dónde cada modo debe centrar sus esfuerzos** para reducir las emisiones en el futuro: el transporte aéreo, continuando con la optimización de sus operaciones; el ferroviario, enfocándose en la construcción eficiente y sostenible, especialmente en futuras renovaciones y ampliaciones de la red.

Identificar estas prioridades es fundamental para garantizar que las estrategias de descarbonización sean efectivas y puedan generar un impacto real y duradero en la reducción de GEI.

REPARTO DE EMISIONES ACUMULADAS POR FASE EN CADA MODO



Fuente: Elaboración propia.

De algunos corredores

Adoptar una visión por corredores permite afinar los resultados obtenidos para la red completa, particularizando las principales conexiones de larga distancia. Este enfoque incorpora tanto las emisiones generadas durante la construcción de infraestructuras como las derivadas de la etapa operativa.

En el caso del **modo ferroviario**, sin embargo, este análisis pierde el valioso **“efecto red”**: la capacidad de una misma infraestructura para ofrecer múltiples conexiones adicionales dentro de la península. Además, se excluye la circulación de trenes Alvia, que utilizan parcialmente la red de Alta Velocidad, así como los servicios AVANT entre puntos intermedios, que no tienen equivalente en el modo aéreo.

Entender estas diferencias es esencial para formular estrategias efectivas que maximicen la eficiencia y sostenibilidad del sistema de transporte.

Se incluyen en el análisis tres corredores:

Madrid – Córdoba – Sevilla / Málaga

Este corredor es el que permite un periodo más largo de análisis. La construcción de la infraestructura de alta velocidad se estima que generó 5,2 millones de t CO₂e, y en total se alcanzan los 6,1 millones de t CO₂e, que incluyen un 11% de emisiones de operación (hasta 2019).

El modo aéreo acumula en el periodo 3,4 millones de t CO₂e. El volumen de demanda ferroviaria acumulado, reforzado por el crecimiento de los últimos años, hace que las emisiones acumuladas por viajero ferroviario (48 kg CO₂e) sean menores que las de cada pasajero aéreo (90 kg CO₂e).

Madrid – Zaragoza – Barcelona

En el caso del Madrid – Barcelona, las emisiones por la construcción de la línea de alta velocidad (estimadas en cerca de 8 millones de t CO₂e) junto con las de operación (hasta 2019) y las de mantenimiento de la infraestructura, suman 8,7 millones de t CO₂e en total. Por su parte, el modo aéreo en el mismo periodo ha emitido 5 millones de t CO₂e, el 97 % de ellas en la fase de operación.

En este caso, las emisiones acumuladas por pasajero aéreo (80 kg de CO₂e/pax) siguen siendo inferiores a las de los viajeros ferroviarios (88 kg de CO₂e/pax).

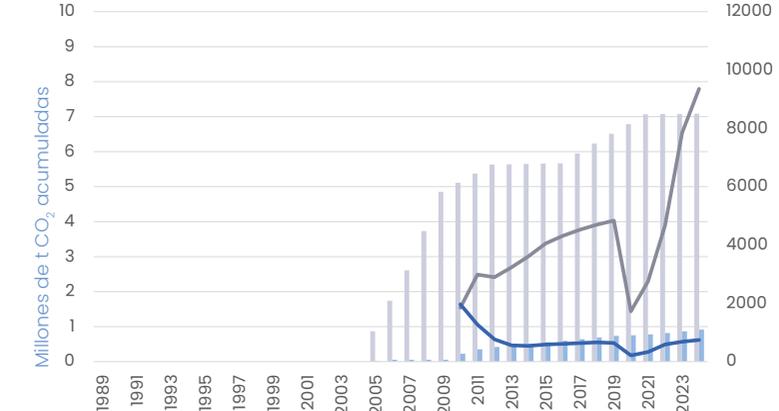
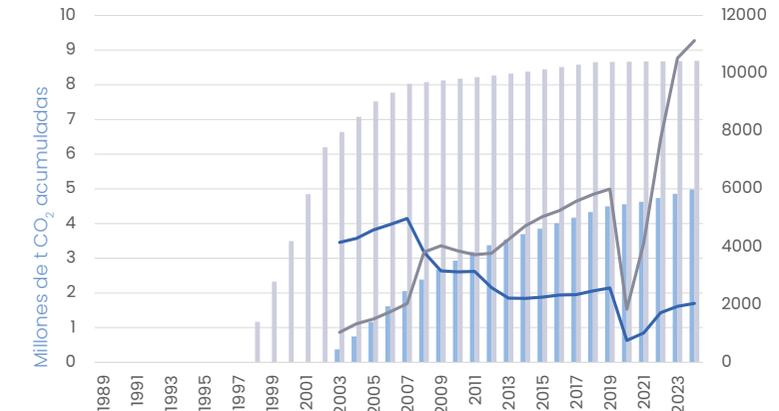
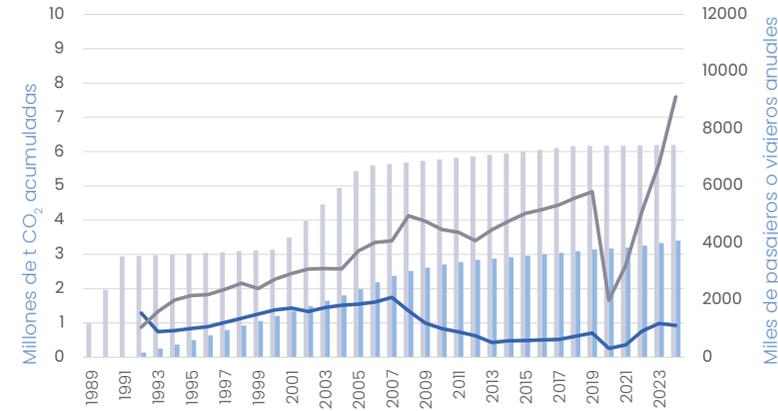
Madrid – Valencia / Alicante – Murcia

El corredor Madrid – Levante es el más reciente de los tres analizados, con unas emisiones de construcción estimadas en 6,9 millones de t CO₂e, y un total de emisiones del modo ferroviario de 7,1 millones de t CO₂e en el periodo analizado.

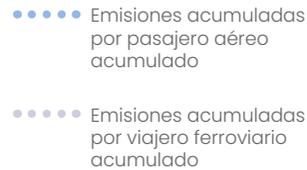
La demanda aérea se ha reducido drásticamente desde la puesta en servicio de la conexión en alta velocidad, habiendo acumulado únicamente en el periodo 0,8 millones de t CO₂e.

Por el momento, las emisiones acumuladas por pasajero aéreo (85 kg de CO₂e/pax) siguen siendo inferiores a las de los viajeros ferroviarios (112 kg de CO₂e/pax).

EMISIONES ACUMULADAS TOTALES EN CADA MODO POR CORREDORES

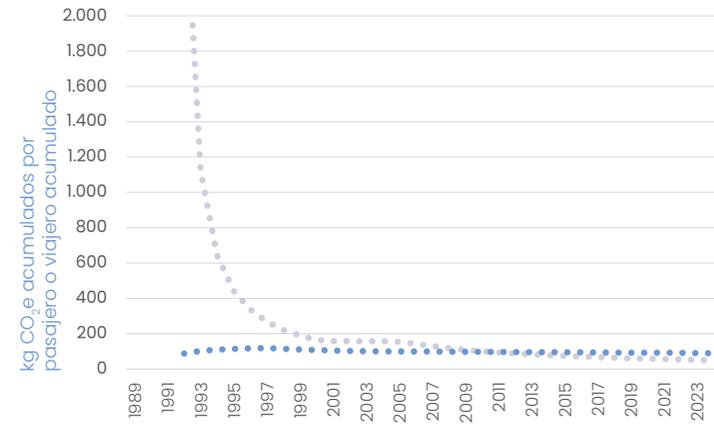


EMISIONES ACUMULADAS TOTALES Y POR PASAJERO/VIAJERO ACUMULADO EN CADA MODO POR CORREDORES

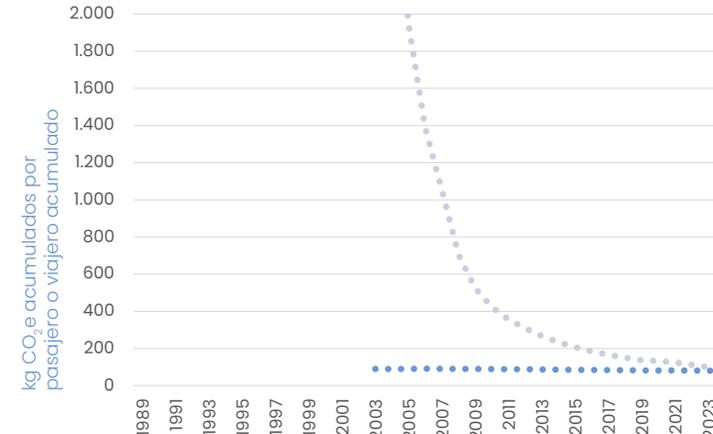


Fuente: Elaboración propia.

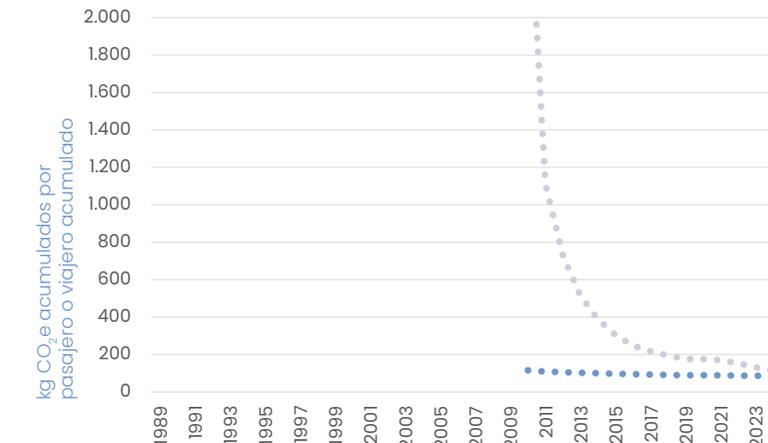
Madrid - Córdoba - Sevilla / Málaga



Madrid - Zaragoza - Barcelona



Madrid - Valencia / Alicante - Murcia



UNA MIRADA AL IMPACTO 360° DEL TRANSPORTE

En un contexto de emergencia climática global, repensar el sistema de transporte desde una perspectiva ambiental es una necesidad. Este informe y la herramienta CarbonTrack360 que lo sustenta, nacen precisamente con ese propósito: ofrecer una visión completa, rigurosa y comprensible del impacto climático del transporte, más allá de los datos tradicionales.

Durante años, el debate sobre las emisiones del transporte se ha centrado casi exclusivamente en la etapa de operación: cuánto contamina un tren

o un avión mientras está en marcha. Sin embargo, esta visión parcial puede llevar a conclusiones engañosas. ¿Qué ocurre con las emisiones generadas al construir una línea de alta velocidad o un aeropuerto? ¿Y con las que se producen durante el mantenimiento o la renovación de estas infraestructuras? ¿Cómo cambia el balance si consideramos todo el ciclo de vida?

CarbonTrack360 responde a estas preguntas con una metodología clara: analizar las emisiones acumuladas a lo largo del tiempo, considerando

las distintas etapas del ciclo de vida de los modos de transporte. Y los resultados son reveladores.

Por un lado, el **transporte aéreo** concentra la inmensa mayoría de sus emisiones en la fase de operación. Esto significa que cualquier mejora en esta etapa —como el uso de combustibles sostenibles (SAF), la optimización del tráfico aéreo o la renovación de flotas— tiene un impacto directo y significativo en la reducción de gases de efecto invernadero. A pesar de que la construcción y mantenimiento de aeropuertos genera emisiones, su peso en el total es muy reducido.

Por otro lado, el **ferrocarril de alta velocidad**, que desde 2019 opera con energía 100 % renovable en España, presenta un perfil muy distinto: sus emisiones se concentran en la fase de construcción. Esto incluye el uso intensivo de materiales como hormigón y acero, y la maquinaria necesaria para construir infraestructuras complejas, especialmente en terrenos accidentados. Aunque su operación es limpia, el esfuerzo inicial en emisiones es considerable, y por tanto, su eficiencia climática depende en gran medida de la demanda que sea capaz de absorber a lo largo del tiempo.

Aquí es donde CarbonTrack360 aporta una herramienta clave: permite identificar los llamados **umbrales de eficiencia climática**. Es decir, el punto a partir del cual un modo de transporte empieza a ser más eficiente que otro en términos de emisiones acumuladas. Por ejemplo, una línea de alta velocidad puede superar en eficiencia al avión si transporta suficientes pasajeros durante un número determinado de años. Pero si la demanda es baja o el terreno muy complejo, ese umbral puede no alcanzarse nunca.

El análisis de corredores reales en España —como Madrid-Sevilla, Madrid-Barcelona o Madrid-Levante— confirma esta lógica. En algunos casos, el ferrocarril ya ha superado al avión en eficiencia por pasajero. En otros, aún no lo ha hecho, pero podría lograrlo si se mantiene el crecimiento de la demanda y se optimizan los procesos constructivos.

Más allá de los números, este informe lanza un mensaje claro: **cada modo de transporte tiene su papel, sus fortalezas y sus retos**. No se trata de elegir entre tren o avión, sino de entender en qué contexto cada uno es más eficiente y cómo

pueden complementarse para construir un sistema de transporte más sostenible.

El futuro pasa por actuar donde más impacto se puede lograr:

En el **modo aéreo**, reduciendo las emisiones operativas mediante innovación tecnológica, nuevos combustibles y una gestión más eficiente del espacio aéreo.

En el **modo ferroviario**, apostando por una construcción más sostenible, con materiales de bajo carbono y procesos optimizados, especialmente de cara a futuras renovaciones.

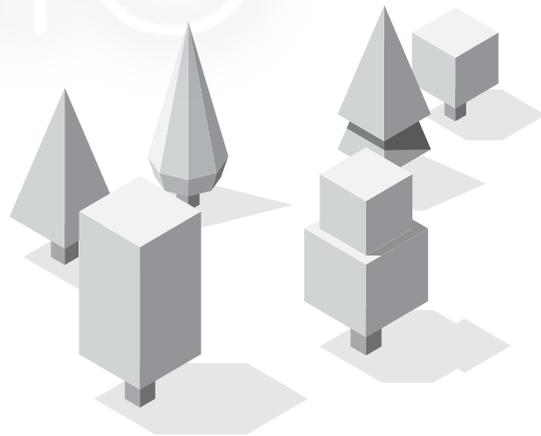
CarbonTrack360 no es una herramienta cerrada, sino un punto de partida. Su valor reside en ofrecer una base sólida para el análisis, la comparación y la toma de decisiones informadas. A medida que se incorporen nuevas variables —como la fabricación y desguace de vehículos, o la renovación de infraestructuras—, su capacidad para anticipar impactos y orientar políticas será aún mayor.

En definitiva, si queremos alcanzar los objetivos climáticos de forma realista y eficaz, necesitamos

herramientas como esta: que no solo midan, sino que ayuden a **comprender, planificar y transformar**. Porque solo con una visión completa del ciclo de vida podremos construir un transporte verdaderamente sostenible.

Esperamos que CarbonTrack360 sea una herramienta útil para avanzar en el análisis climático del transporte, que contribuya a una reflexión más completa y rigurosa sobre su impacto, y que sirva de base para decisiones más informadas. Nuestra intención es que siga evolucionando, incorporando progresivamente aquellos aspectos que aún no han sido contemplados. Seguiremos escuchando con atención las reacciones, aportaciones y sugerencias de los distintos agentes involucrados, con el objetivo de mejorar y enriquecer esta herramienta.

GLOSARIO



ACV: Análisis del Ciclo de Vida.

CAS / SAF: Combustibles de Aviación Sostenible / Sustainable Aviation Fuels.

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

CNMC: Comisión Nacional de Mercados y Competencia.

CORES: Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos.

CORSIA: Plan de Compensación y Reducción del Carbono para la Aviación Internacional.

EASA: European Union Aviation Safety Agency.

EEE: Espacio Económico Europeo: zona económica que comprende a los países de la Unión Europea (UE) y los tres países de la Asociación Europea de Libre Comercio (AELC) que no son miembros de la UE: Islandia, Liechtenstein y Noruega.

GdO: Garantía de Origen Renovable.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

ICEC: ICAO Carbon Emissions Calculator.

OACI / ICAO: Organización de Aviación Civil Internacional.

RCDE / ETS: Régimen de Comercio de Derechos de Emisión / Emissions Trading System.

Refuel EU: Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport.

SES2+: Single European Sky. Reglamento (UE) 2024/2803 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2024, relativo a la realización del Cielo Único Europeo.

NOTAS

1 **Regulado según la Circular 2/2021 de la CNMC.**

<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-2570>

2 **Sistema Español de Inventario de Emisiones.**

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-.html>

3 **Eurostat**

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_air_gge__custom_16784757/default/table?lang=en

4 **Refuel Aviation**

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023AP0319&qid=1747737438824>

5 No son admisibles los biocombustibles de aviación producidos a partir de cultivos alimentarios y forrajeros, incluidos los biocombustibles con alto riesgo de cambio indirecto del uso de la tierra.

6 **European Aviation Environmental Report 2025**

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/EASA_EAER_2025_BROCHURE_WEB_es_v2.pdf

7 **Estadísticas de biocarburantes**

<https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/biocarburantes/estadisticas.html>

8 **SES2+**

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX:32024R2803>

9 **Plan Maestro de Gestión del Tráfico SESAR**

<https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/SESAR%20Master%20Plan%202025.pdf>

10 **RCDE-UE**

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02003L0087-20240301>

11 **European Aviation Environmental Report 2025**

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/eaer-downloads/EASA_EAER_2025_BROCHURE_WEB_es_v2.pdf

12 **ICAO Carbon Emissions Calculator (ICEC)**

<https://www.icao.int/environmental-protection/Carbonoffset/Pages/default.aspx>

13 Se ha tomado este porcentaje por ser el de los pasajeros peninsulares frente al total de pasajeros en España, si bien, en un enfoque de inversión mínima para atender a esta demanda, las emisiones serían probablemente superiores.

AUTORAS

ELENA CURTO

MARÍA LÓPEZ-MATEOS

COLABORADORES

VIRGINIA FUENTES

CARLOS RUBIO

DESARROLLO HERRAMIENTA

MARÍA CIFUENTES

SERGIO GARRIDO

