

BALANCE AMBIENTAL DEL CORREDOR NORTE DEL TREN DE ALTA VELOCIDAD DE ESPAÑA: UN ENFOQUE DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

ENVIRONMENTAL BALANCE OF THE HIGH SPEED RAIL LINE IN THE NORTHERN SPAIN: A LIFE CYCLE ANALYSIS APPROACH

Andoni Kortazar¹

Departamento de Economía Aplicada V de la UPV/EHU

Gorka Bueno²

Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU

David Hoyos³

Facultad de Economía y Empresa de Bilbao, UPV/EHU

Fecha de recepción: 22.03.2020

Fecha de aceptación: 22.09.2020

Resumen

España es el segundo país del mundo con más kilómetros de alta velocidad construidos y en servicio del mundo. El Tren de Alta Velocidad (AV) se ha presentado como el medio de transporte sostenible y con más potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y para el ahorro energético. La mayoría de estudios que se han realizado sobre este modo de transporte han puesto la atención en analizar y estimar estos ahorros en términos de operación de la red obviando, sin embargo, las cargas asociadas a la construcción de la infraestructura.

Este artículo analiza las cargas ambientales de construcción y operación del Corredor Norte de AV y verifica si su construcción está justificada en términos de reducción de impactos ambientales y reducción de consumo energético. Para ello integra en el estudio la fase de construcción y mantenimiento de la línea, junto a la de operación. Más concretamente, el estudio se basa en la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV), que incluye el cálculo de las cargas asociadas a la construcción de la infraestructura y las reparte a lo largo de su vida útil.

Este estudio concluye que esta línea Norte de alta velocidad no compensará, durante su vida útil, los impactos ambientales generados en su fase de construcción y mantenimiento, ni tampoco contribuirá a un ahorro energético neto.

Palabras clave: *Tren de alta velocidad, Movilidad Sostenible, Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Impacto ambiental, Consumo energético.*

¹ andoni.cortazar@ehu.eus

² gorka.bueno@ehu.eus

³ david.hoyos@ehu.eus

Abstract

Spain has the world's second longest network of High-Speed Rail (HSR) lines built and in service. HSR is usually presented as a sustainable means of transport with huge potential to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and energy consumption. The majority of studies carried out on this mode of transport have focused on analysing and estimating these savings in terms of network operation, but sometimes ignore the burdens associated with the construction of the infrastructure.

This article analyzes the environmental loads of construction and operation of the Northern Corridor and verifies if its construction is justified in terms of reducing environmental impacts and reducing energy consumption. To do so, it integrates into the study the construction and maintenance phase of the line, together with the operation phase. More specifically, the study is based on the life cycle analysis (LCA) methodology, which includes the calculation of the loads associated with the construction of the infrastructure and distributes them throughout its useful life.

This study concludes that this high-speed North line will not compensate, during its useful life, the environmental impacts generated in its construction and maintenance phase, nor will it contribute to net energy savings.

Keywords: *High Speed Train, Sustainable mobility, Life Cycle Analysis (LCA), Environmental impact, Energy consumption.*

INTRODUCCIÓN

La crisis ambiental es una realidad que requiere la implementación de medidas urgentes y la movilidad juega un papel clave en esta estrategia. La UE ha establecido objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para 2050 en relación con 1990: al menos 40% para 2030, 60% para 2040 y 80% para 2050, y el sector del transporte, en particular, debería reducir sus emisiones de GEI al menos 60% para 2050 y en relación con 1990 (European Commission, 2011). Casi todas las actividades que presuponen movimiento dependen del petróleo y, además, se espera que la actividad de transporte se duplique para 2050 (European Commission, 2013), lo que dificultaría que la UE cumpla esos objetivos ambientales y climáticos (European Environment Agency, 2018). La Comisión Europea insiste reiteradamente en la necesidad de aplicar una serie de medidas para limitar la contribución de la actividad de transporte al cambio climático, llamando a fortalecer las evaluaciones ambientales de las iniciativas políticas con grandes impactos ambientales (European Commission, 2013).

Según la Agencia Europea del Medio Ambiente, las medidas actuales para limitar los impactos ambientales y climáticos del sector del transporte en Europa no parecen ser suficientes para cumplir los objetivos a largo plazo de la UE (European Environment Agency, 2018). Por lo tanto, son necesarias nuevas medidas que limiten aún más la contribución de la actividad de transporte al cambio climático. En términos de una estrategia común para una movilidad sostenible, deberían promoverse modos de transporte más respetuosos con el medio ambiente (European Commission, 2012) y el tren de alta velocidad (TAV) parece cumplir ese papel, ya que el transporte ferroviario puede tener un enorme potencial para lograr reducciones de emisiones de GEI y ahorro de energía (California High-Speed Rail Authority, 2016; European Court of Auditors, 2018; Jehanno et al., 2011). Dado que el TAV funciona con electricidad, se argumenta que el beneficio ambiental es claro porque cambia a los pasajeros de modos de transporte más contaminantes (automóvil, avión...) a uno con menos emisiones atmosféricas.

España es el segundo país del mundo con más kilómetros de alta velocidad construidos y en servicio del mundo, siendo solo superada por China en kilómetros de Alta Velocidad. En términos relativos, España es líder mundial. AVE (Alta Velocidad Española) es como se conoce al tren de alta velocidad en España y sus trenes pueden circular a velocidades máximas de 310 km/h por líneas de ancho internacional de 1 435 mm electrificadas a 25 kV y 50 Hz en recorridos de larga distancia. Actualmente, estos servicios de alta velocidad se ofrecen bajo diferentes opciones comerciales además del AVE, como son ALVIA, AVANT y AV-City. En 2005, la empresa estatal RENFE se dividió en dos compañías, Renfe Operadora y ADIF. La primera es la operadora de viajeros y mercancías del sector ferroviario español y se encarga del mantenimiento y construcción de trenes. La segunda, por el contrario, es la compañía encargada de la explotación de la infraestructura ferroviaria y, por tanto, la encargada de la construcción y mantenimiento de las líneas de alta velocidad.

La primera línea de AVE, entre Madrid y Sevilla, fue inaugurada el 21 de abril de 1992 y desde entonces la red se ha extendido por todo el territorio. Actualmente existen cuatro corredores principales que unen diferentes regiones con la capital del Estado. Esos cuatro corredores son: Madrid-Cataluña, Madrid-León, Madrid-Levante y Madrid-Andalucía. En total, 2 500 km estaban en servicio ya en 2015 y actualmente están en construcción o proyectados varios tramos más.⁴ La mayoría del trazado de AVE es construcción totalmente nueva con ancho internacional (1 435 mm) y para solventar el efecto barrera que supone el hecho de que el tren convencional de España circule sobre ancho ibérico (1 668 mm), se utilizan trenes de ancho variable que pueden desplazarse por ambas redes (Zembri y Libourel, 2017).

⁴ A finales de 2019 hay 3.402 km en operación (ADIF, 2019).

Se denomina Corredor Norte al conjunto de líneas de AV que tienen como destino regiones del norte de España. Estas líneas son la LAV Madrid-Galicia (Eje atlántico), LAV Madrid-Asturias y LAV Madrid-País Vasco (Y Vasca). Estas líneas se encuentran actualmente en obras en sus tramos finales y operan de manera parcial, por lo que el objeto de este estudio son solo los tramos que van desde Madrid-Chamartín hasta León y desde Olmedo hasta Zamora. El tramo Ourense-Santiago de Compostela, perteneciente a la LAV Madrid-Galicia y que opera desde el 10 de diciembre de 2011, se deja fuera de este estudio ya que se considera que no cumple las características propias de AV, al ser un tramo de línea en ancho ibérico (1435 mm) y no en ancho internacional (1435 mm).

A pesar de presentar al TAV como el medio de transporte sostenible y con más potencial para alcanzar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y ahorro energético, existen muchas dudas respecto a esas ventajas y sobre los estudios que sustentan esas afirmaciones. La mayoría de estudios ambientales que se han realizado sobre este tipo de transporte han puesto la atención en analizar y estimar estos ahorros en términos de operación de la red y han obviado las cargas asociadas a la construcción, mantenimiento y desmantelamiento de la infraestructura (Bueno et al., 2017; Chester y Horvath, 2010; Jones et al., 2016).

Tras esta introducción y descripción de los antecedentes del proyecto en la sección 1, se presentan los objetivos y alcance del estudio en la sección 2 y en la sección 3 se presenta la revisión bibliográfica realizada. En la sección 4 se estudia el caso: (1) se exponen los datos e información de la línea de AV analizada (sección 4.1); (2) se presentan los datos necesarios para el estudio (sección 4.2); (3) se describen las características y propiedades de la modelización (sección 4.3); (4) se describen las características y propiedades de los diferentes escenarios planteados (sección 4.4). En la sección 5 se exponen los resultados y la discusión de los mismos. Finalmente, en la sección 6, se muestran las conclusiones extraídas del estudio.

OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

Para una correcta contabilización de todos los beneficios y costes ambientales de una infraestructura de este tipo es preciso tener en cuenta todas las fases de su vida útil. El objetivo principal de este trabajo es analizar el potencial que tiene esta línea AV para mitigar el cambio climático y reducir el consumo de energía y verificar si contribuirá al logro de los objetivos establecidos por la UE para 2050. Para ello se estudian los impactos ambientales asociados con la construcción, mantenimiento y operación del Corredor Norte de alta velocidad de España bajo un horizonte de vida de 60 años siguiendo la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y utilizando los últimos datos disponibles. De esta manera, el alcance geográfico del estudio es la totalidad del Corredor Norte AV que en 2016 conectaba las estaciones de Zamora y León con Madrid.

La unidad funcional para este análisis de ciclo de vida es el servicio de transporte proporcionado por la infraestructura del AVE en un año de operación (el servicio de transporte considerado para cada modo se mide en términos de personas-km/año). Para ello, por simplicidad en el análisis, se ha supuesto que durante todos y cada uno de los años del ciclo de vida de la infraestructura se mantienen invariables: los niveles de transporte de pasajeros a lo largo del corredor; los viajeros desplazados desde otros modos de transporte; y los impactos ambientales asociados tanto a la operación de la AV como a la operación de los otros modos (automóvil, autobús, tren convencional, avión). No se incluye en este análisis el transporte de mercancías, ya que esta línea está diseñada exclusivamente para el transporte de pasajeros.

La construcción de este tipo de infraestructuras necesita cantidades inmensas de hormigón y acero, lo que exige grandes consumos de energía y emisiones contaminantes muy considerables a la atmósfera. Desde una perspectiva ambiental, no está justificado dejar fuera de estudio estas fases. Este trabajo pretende solventar ese problema y realiza un análisis integral de las cargas ambientales más importantes generadas en el ciclo de vida completo de la infraestructura y no solo las de operación. Este estudio se

basa en la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) que analiza las cargas ambientales de esta infraestructura a lo largo de su vida útil para verificar si su construcción está justificada en términos de reducción de impactos ambientales y reducción de consumo energético. Para ello, el nivel de utilización anual de la infraestructura se mide en términos de pasajeros-km/año, o de pasajeros/año promediados sobre la infraestructura completa.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

No existen en la literatura científica muchos trabajos de ACV sobre el transporte ferroviario de alta velocidad. Chester y Horvath (2010) han realizado un estudio sobre la línea de AV de California (CAHSR, 1 100 km) que actualmente se encuentra en construcción. Estiman que para equilibrar la huella de carbono de la construcción de la infraestructura se necesitarán entre 6 y 8 años siempre que la tasa de ocupación del TAV fuese mayor que en el resto de modos de transporte. Algo parecido concluyen Chang y Kendall (2011), que han analizado la línea entre San Francisco-Anaheim (CAHSR, 725 km). Estos consideran que se necesitarán 6 años para amortizar las emisiones de GEI, aunque si las tasas de ocupación son más bajas pueden necesitarse hasta más de 20 años. Barnes (2014) también analiza la línea de California y muestra que la sustitución de parte del cemento por cenizas volantes en la producción de hormigón y el uso de energía renovable en la AV son las opciones más factibles para que CAHSR sea más eficiente en la lucha contra el cambio climático. Yue et al. (2015) realizan el ACV sobre la línea de AV de China Beijing-Shanghai, concluyendo que la fase de operación del tren de AV contribuye de manera más importante sobre el medio ambiente que la construcción de su infraestructura, y que estos impactos se pueden reducir de manera sustancial si se reduce el uso de carbón en la producción eléctrica, se optimiza el uso del tren, se utiliza la ceniza volante, o si se limita la construcción de puentes y túneles.

Son varios los trabajos que se han realizado en Europa respecto a las diferentes líneas de AV. Banar y Özdemir (2015) realizan el ACV sobre la red de AV de Turquía y determinan que, de todas las cargas ambientales, el 58% corresponden a la fase de construcción y el 42% al de operación. Akerman (2011) estudia la línea Europabanan sueca también desde una perspectiva de ACV, determinando que las emisiones totales pueden reducirse en 0.55 millones de toneladas equivalentes de CO₂ al año. Cornet et al. (2017) analizan la huella de carbono del mayor proyecto de infraestructura de transporte del siglo en el Reino Unido, el TAV que unirá Londres con diferentes ciudades del norte, y defienden que éste no contribuirá a la reducción de las emisiones de CO₂.

Para un caso más cercano, Jones et al. (2016) han desarrollado el estudio que analiza los impactos ambientales totales del ciclo de vida de la futura línea de AV de Portugal entre Lisboa y Oporto. Estos exponen que la operación del tren de AV es el mayor contribuyente a las emisiones atmosféricas totales del proyecto (69% de CO₂, 76% de SO₂, 82% de PM₁₀), mientras el resto serían las cargas asociadas a la construcción, mantenimiento y fin de vida.

Sobre la red de AVE en España, no existe un estudio completo que considere todas las cargas ambientales asociadas a la vida útil del proyecto. García Álvarez (2010) concluye que cada pasajero de AV contribuye a una reducción de 30 kg de CO₂, pero sin tener en cuenta la construcción de la infraestructura. En cambio, Bueno et. al (2017) realizan un análisis ambiental de la línea de AV de Euskadi (Y Vasca) perteneciente a la red de AVE utilizando la metodología de ACV que incluye la fase de construcción y mantenimiento de la infraestructura. Estos concluyen que nunca se compensarán las emisiones de CO₂ asociadas a la construcción y mantenimiento y que se necesitarán 55 años antes de empezar a tener algún ahorro energético.

Las grandes diferencias en los impactos ambientales netos entre unas infraestructuras y otras dependen de las características de cada red, pero sobre todo del nivel de utilización de la infraestructura en su vida útil.

Cuenot (2016) realiza para la UIC (International Union Railway) una síntesis de los trabajos sobre las principales metodologías para el cálculo de la huella de carbono de diferentes líneas ferroviarias y concluye que el trabajo más preciso, transparente y con más garantías de ofrecer resultados más fiables es el realizado por Tuchschnid et al. (2011). Es por eso que para los cálculos de las cargas de construcción de la infraestructura este estudio utiliza los coeficientes de impacto ambiental (ver Apéndice) obtenidos en ese trabajo.

ESTUDIO DEL CASO: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL CORREDOR NORTE DE AV DE ESPAÑA

Corredor Norte

Se denomina Corredor Norte al conjunto de líneas de AV que tienen como destino regiones del norte de España. Estas líneas son la LAV Madrid-Galicia (Eje atlántico), LAV Madrid-Asturias y LAV Madrid-País Vasco (Y Vasca). Estas líneas se encuentran actualmente en obras en sus tramos finales y operan de manera parcial, por lo que son objeto de este estudio solo los tramos que van desde Madrid-Chamartín hasta León y desde Olmedo hasta Zamora. El tramo Ourense-Santiago de Compostela, perteneciente a la LAV Madrid-Galicia y que opera desde el 10 de diciembre de 2011, se deja fuera de este estudio ya que se considera que no cumple las características propias de AV, al ser un tramo de línea en ancho ibérico (1435 mm) y no en ancho internacional (1435 mm).

Los diferentes tramos que conforman el corredor Norte de AV de España se han ido inaugurando en diferentes fases. El primer tramo en inaugurarse fue el de Madrid-Chamartín hasta Valladolid (179 km) el día 22 de diciembre de 2007. Esta línea se extendió hasta León (166 km) el día 29 de septiembre de 2015. Y el último tramo en ponerse en servicio fue el que va desde Olmedo hasta Zamora (99 km) el día 17 de diciembre de 2015. Estos tramos son precisamente los que conforman el esquema de línea objeto de este estudio.

FIG.1
MAPA DE LA RED DE AVE A 2018. CORREDOR NORTE



Fuente: www.enterate.com (2018).

Datos

Para analizar las cargas ambientales de una infraestructura ferroviaria es necesario disponer, por un lado, de una descripción detallada de la infraestructura o inventario de todos los materiales utilizados y, por otro

lado, del número de viajeros y la longitud de sus trayectos. De esta manera, se podrá calcular el balance neto anual para cada indicador.

Detalles del Corredor Norte AVE

Para el cálculo de las cargas ambientales de la fase de construcción y mantenimiento de cualquier infraestructura ferroviaria de alta velocidad es preciso disponer del esquema detallado de cada ramal. Esto quiere decir disponer de los mapas, trazados, infraestructuras, medidas, características... En el caso del AVE, no es fácil encontrar esquemas que permitan identificar las características detalladas de cada línea. La mayor parte de la información disponible son esquemas parciales que no posibilitan una correcta caracterización.

Para solventar este problema se ha optado por hacer un repaso exhaustivo de la línea a través de Google Maps y Google Earth. Por medio de la vista por satélite se ha podido determinar la infraestructura al detalle y, por medio de la regla que facilitan estas herramientas, se ha podido medir la longitud de cada uno de los viaductos o túneles. Para el tramo entre Valladolid y León se ha utilizado el esquema de la línea publicado en el Observatorio del Ferrocarril de España (2016) (ver Fig 1 apéndice).

Este Corredor Norte tiene una longitud total de 445.20 km construidos y en operación en el año 2016. En este corredor se encuentra el túnel de Guadarrama con 28.4 km de longitud, el más largo de toda la red de AV de España, el segundo de Europa y noveno del mundo. A pesar de este y otros túneles, la orografía en general no es de las más exigentes a nivel constructivo y tan solo el 10.5% del trazado son túneles y el 4.7% puentes y viaductos.

TABLA 1
DETALLES DE LA LÍNEA DE AV DEL CORREDOR NORTE. ELABORACIÓN PROPIA.

	km		%
Túneles	46.73		10.50%
Puentes y viaductos	20.91		4.70%
A cielo abierto	377.55		84.81%
Total km	445.20		100.00%

Datos de viajeros por estación de AV

Otro de los problemas que se ha encontrado a la hora de poder avanzar en este proyecto ha sido la ausencia de datos cuantitativos de pasajeros de alta velocidad como tal. El objetivo de este estudio es calcular las cargas ambientales de la red de AV por persona y kilómetro de transporte de viajeros. Esto exige disponer de los datos de transporte de viajeros a través del corredor de alta velocidad, medido en pkm, y calculado como la suma de las longitudes de todos los trayectos recorridos por todos y cada uno de los viajeros en la red. El cálculo de este transporte presenta dos problemas.

Por un lado, Renfe Operadora, única empresa operadora de viajeros del sector ferroviario español, publica los datos de viajeros de alta velocidad incluidos en la estadística de viajeros de larga distancia convencional. Por otro lado, Renfe tampoco proporciona el dato de las distancias totales que recorren los viajeros de alta velocidad. A pesar de solicitar esos datos desglosados por las vías que Renfe pone a disposición de los interesados, la respuesta de Renfe ha sido negativa. La única información disponible, limitada a la AV, es la proporcionada a *El País* por Renfe Operadora sobre los datos de viajeros por estación de alta velocidad del año 2015 y recogida en el artículo de Galán et al. (2017), donde solo se recogen las entradas y salidas de pasajeros por estación. La misma información, pero con datos de pasajeros de AV del año 2016, se puede encontrar en el artículo de García (2017) del diario digital *El Independiente*. Ambos trabajos, sin embargo, sin la información vital para este estudio sobre las distancias recorridas por cada viajero.

La información, sin embargo, permite acotar el transporte de viajeros a través de la infraestructura de AV. Para ello hemos desarrollado un algoritmo programado en Python que permite calcular, de forma aleatoria en una primera fase, y de forma recursiva posteriormente, una matriz de desplazamientos entre estaciones que sea compatible con la información proporcionada por *El País*. Para un ramal de la línea de alta velocidad concreto con n estaciones, caracterizado por su matriz de distancias (una matriz $n \times n$ con las distancias entre las n estaciones) y un vector con los viajeros anuales que salen/entran por cada estación, el algoritmo es capaz de generar aleatoriamente una serie de tráficos que cumplen con las condiciones de contorno (los datos de pasajeros en estaciones proporcionados por *El País*). Con estos tráficos, el algoritmo calcula el transporte real en la infraestructura. Este transporte no es más que uno posible, y por ello hemos calculado muchos tráficos posibles, aleatoriamente.

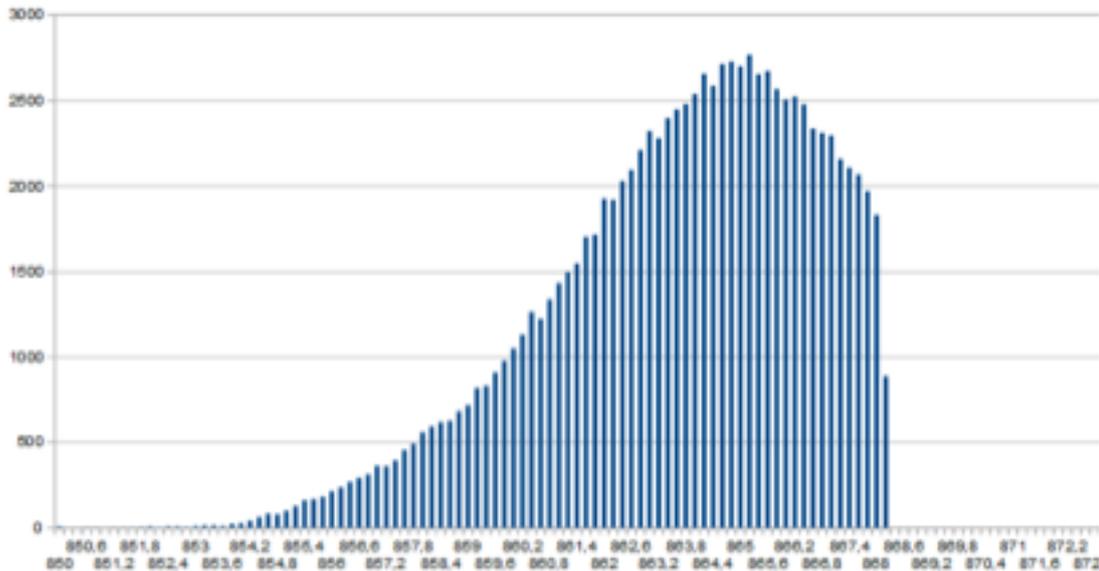
La Tabla 2 muestra la matriz de distancias entre estaciones del Corredor Norte. La Figura 2 muestra, por otro lado, el histograma de los pasajeros transportados sobre la infraestructura completa en 100.000 escenarios posibles de tráfico entre estaciones, generados aleatoriamente, y que cumplen con las condiciones de contorno. Puede observarse que mientras que el total de viajeros que se desplazan por el corredor es de 2.41 millones de pasajeros al año, el promedio de pasajeros anuales sobre la infraestructura completa es significativamente inferior (o dicho de otro modo, el recorrido medio de cada viajero es inferior a la longitud total del trazado de la infraestructura). El valor medio de los 100 000 escenarios analizados es de 864 000 pasajeros transportados sobre la infraestructura completa, lo que equivale a un transporte de 384 653 664 pkm.

TABLA 2
MATRIZ DE DISTANCIAS ENTRE ESTACIONES Y PASAJEROS SUBIDOS Y BAJADOS DE CADA ESTACIÓN DE AV DEL CORREDOR NORTE.

PASAJEROS miles (entradas y salidas) 2016	Madrid-León (km)	Madrid- Chamartín	Segovia Guiomar (AV)	Valladolid Camp.Gran.	Palencia	León	Medina del Campo (AV)	Zamora
2382.97	Madrid- Chamartín	0	68.3	179.3	230.6	345.4	155	232.46
920.67	Segovia Guiomar (AV)	68.3	0	111	162.3	277.1	86.7	164.16
1059.53	Valladolid Camp,Gran,	179.3	111	0	51.3	166.1	68.3	145.8
95.85	Palencia	230.6	162.3	51.3	0	114.8	119.6	197.06
277.99	León	345.4	277.1	166.1	114.8	0	234.4	311.86
16.3	Medina del Campo (AV)	155	86.7	68.3	119.6	234.4	0	77.46
69.5	Zamora	232.46	164.16	145.8	197.06	311.86	77.46	0
4822.81								

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2
HISTOGRAMA DE LA ESTIMACIÓN DE LOS PASAJEROS TRANSPORTADOS SOBRE LA
INFRAESTRUCTURA COMPLETA EN EL CORREDOR NORTE DEL AVE



Fuente: Elaboración propia.

Descripción de la modelización

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, sistema o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida, siguiendo el enfoque “de la cuna a la tumba”. El ACV se apoya en la recopilación y análisis de todas las entradas (consumo de energía y materiales) y salidas (emisiones, residuos, otros subproductos) del sistema bajo estudio. El ACV de un producto o servicio se apoya, a menudo, en la utilización de exhaustivas bases de datos que recopilan el inventario del ciclo de vida de otros productos y procesos ya analizados.

El balance ambiental neto de la nueva infraestructura vendrá dado por la comparación de los impactos ambientales de todos los modos de transporte en dos escenarios alternativos, uno sin LAV, y el otro con LAV en servicio. Por lo tanto, el impacto ambiental neto (IA) de construir y operar una nueva LAV para una categoría concreta de impacto ambiental (CO_2eq , NO_x ...) se puede representar matemáticamente para un año t como:

$$IA_{\text{Neto}}(t) = IA_{\text{conLAV}}(t) - IA_{\text{sinLAV}}(t) \quad [1]$$

Sin embargo, calcular todos los impactos ambientales del escenario sin LAV puede resultar muy laborioso y complejo, ya que exigiría hacer un análisis completo de todos y cada uno de los modos de transporte utilizados y sus infraestructuras, por lo que se escoge otra estrategia matemáticamente equivalente e igualmente rigurosa. Esta estrategia consiste en limitar el análisis exclusivamente a las diferencias entre los dos escenarios, y que afectan, por un lado, al transporte de pasajeros en la LAV en el escenario con LAV y, por otro lado, al transporte de pasajeros que se desplazan desde otros modos de transporte a la LAV, en el escenario sin LAV. Uno de los argumentos esgrimidos cuando se decide construir una infraestructura de AV es, precisamente, el desplazamiento de viajeros de otros modos más contaminantes hacia el tren de alta velocidad, para así obtener una reducción neta en impactos ambientales. Nuestra estrategia, por tanto, calculará los impactos ambientales del transporte en AV en el

escenario con LAV, considerando las fases de construcción, mantenimiento y operación, y a ellos restará las cargas ambientales que hubiera dado lugar el transporte de los viajeros desplazados a la LAV desde otros modos de transporte, con peores tasas de emisiones y mayores niveles de intensidad energética, en el escenario sin LAV. Así, matemáticamente se puede expresar:

$$IA_{Neto} = IA_{transporte\ en\ LAV} - IA_{transporte\ desplazado\ sin\ LAV} \quad [2]$$

A fin de obtener el balance ambiental neto de la infraestructura de alta velocidad de este corredor, se deberán calcular, por un lado, las cargas ambientales asociadas a su construcción y mantenimiento y, por otro, las asociadas a su operación en toda su vida útil. Ello indicará si ese proyecto supone una mejora en materia medioambiental respecto a otras alternativas, será el balance neto por lo que a esas cargas totales se deberán restar los beneficios ambientales que se obtienen de desplazar viajeros de otros modos de transporte con peores tasas de emisiones y mayores niveles de intensidad energética. Así, matemáticamente se puede expresar:

$$IA_{Neto} = \sum IA_{const\ \wedge\ mant}^{AVE} + \sum IA_{Operación}^{AVE} - \sum_{i=1}^n T_{i \rightarrow AVE}^i \cdot C^i \quad [3]$$

Esta sección se divide en dos partes; la primera parte (4.3.1) calcula las cargas ambientales asociadas a la fases de construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura, y la segunda parte (4.3.2) calcula los ahorros en materia ambiental producida por la atracción de viajeros de otros modos de transporte más contaminantes hacia el tren de alta velocidad. Por lo tanto, los posibles beneficios ambientales, en términos de consumo de energía y de emisiones atmosféricas de una nueva línea de alta velocidad, dependen críticamente de la capacidad de atraer cantidades sustanciales de tráfico desde otros modos de transporte con altas emisiones y niveles de intensidad energética.

Este estudio está basado en el marco para el análisis de las infraestructuras de transporte desarrollado por Tuchschild et al. (2011) para la UIC ya que en el estudio de Cuenot (2016), donde se analizan los diferentes estudios desarrollados a nivel internacional, se determina que es el estudio más preciso y transparente que permite obtener los resultados más fiables. Así, este estudio considera las mismas seis categorías de impacto ambiental que cubren una amplia variedad de parámetros ambientales⁵:

- Demanda de energía acumulada: (*Cummulative Energy Demand, CED*) *Unidad: MJ-equivalente*
- Calentamiento Global (CO₂eq): *Unidad: Kilogramo*
- Material particulado (PM₁₀): *Unidad: Gramo.*
- Dióxido de azúfre (SO₂): *Unidad: Gramo.*
- Hidrocarburos no-metánicos (NMHC): *Unidad: Gramo.*
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): *Unidad: Gramo.*

Construcción, mantenimiento y operación de la línea de AV

$$IA_{Neto} = \sum IA_{const\ \wedge\ mant}^{AVE} + \sum IA_{Operación}^{AVE} \quad [4]$$

La construcción y mantenimiento de una infraestructura ferroviaria de alta velocidad es muy compleja con altos índices de consumo de materiales y energético. Este corredor Norte tiene una longitud de 445.20 km que incluyen las distancias de Madrid a León y desde Olmedo a Zamora y que es el trazado de AV

⁵ Este análisis se enfoca en seis indicadores ambientales principales: emisiones de GEI, consumo de energía, PM10, SO2, NOX y NMVOC. Sin embargo, se debe tener en cuenta que otras dimensiones ambientales también se ven afectadas por la construcción y operación del TAV, tales como: fragmentación del hábitat, impactos en la flora y la fauna (afectando la biodiversidad), ocupación de tierras fértiles, impacto paisajístico y visual, ruido y vibraciones. hecho, los impactos son generalmente similares en carretera como en ferrocarril (Cour des Comptes, 2015; Dorsey et al., 2015; Jehanno et al., 2011).

construido y en operación en 2016. De la totalidad del trazado 46.73 km (10.5%) son túneles y 20.91 km (4.7%) son viaductos y puentes. Destacan por su longitud los túneles independientes de Guadarrama con 28.40 km cada boca. En la mayoría del trazado se han dispuesto dos vías de ancho internacional (1 435 mm) y van electrificadas con 25 kV que permiten alcanzar velocidades máximas de 300 km/h. Con estos datos se pueden obtener las cargas ambientales de la construcción y mantenimiento de la infraestructura. A cada ítem de la infraestructura se le aplicará el coeficiente de impacto correspondiente localizado en el informe de Tuchschnid et al. (2011).

Los impactos ambientales asociados a la operación de los diversos modos de transporte se han calculado a partir de la información recopilada en la base de datos Ecoinvent, versión 3.6, procesada con el software openLCA. Esta base de datos también recoge información sobre las cargas ambientales asociadas a la construcción y mantenimiento del resto de infraestructuras y vehículos (carreteras, automóvil, autobús; tren convencional, avión, etc.). Esta información sobre las cargas ambientales del transporte en los diferentes modos está procesada y accesible en términos de impacto/pkm (p.e., emisiones de CO₂, en gCO₂eq/pkm). Estas cargas asociadas a la operación del tren se obtienen aplicando los coeficientes de impacto (Tabla 3) de Ecoinvent al tráfico total medido en pkm:

TABLA 3
COEFICIENTES DE IMPACTO AMBIENTAL DE LOS DIFERENTES MODOS DE TRANSPORTE.

Modo de transporte	Calentamiento Global	gCO ₂ eq·pkm ⁻¹	CED MJ·pkm ⁻¹	PM ₁₀ g·pkm ⁻¹	SO ₂ g·pkm ⁻¹	NO _x g·pkm ⁻¹	NMVOG g·pkm ⁻¹
Avión pasajeros, corto recorrido	279.41	2.41	0.04	0.22	0.72	0.10	
Autobús pasajeros	49.51	0.82	0.03	0.06	0.47	0.05	
Coche particular mix (56% diesel, 44% gasolina, 1.68 p/v)	192.49	2.9	0.13	0.36	0.48	0.17	
Coche particular mix (56% diesel, 44% gasolina, 2.52 p/v)	128.32	1.93	0.09	0.24	0.32	0.11	
Coche particular mix (56% diesel, 44% gasolina, 3.36 p/v)	96.24	1.45	0.07	0.18	0.24	0.08	
Coche eléctrico, producción eléctrica España 2016, 1.68 p/v	86.19	1.94	0.14	0.46	0.27	0.07	
Coche eléctrico, producción eléctrica 100% renovable, 3.36 p/v	27.93	0.70	0.06	0.15	0.09	0.04	
Tren pasajeros, producción eléctrica España 2016	50.16	1.15	0.05	0.18	0.29	0.03	
Tren pasajeros, producción eléctrica 100% renovable	27.31	0.75	0.04	0.06	0.21	0.03	
Tren Alta Velocidad, producción eléctrica España 2016, (TAV infraestructura excluida)	28.40	0.82	0.03	0.13	0.09	0.01	
Tren Alta Velocidad, producción eléctrica 100% renovable, (TAV infraestructura excluida)	6.41	0.44	0.02	0.02	0.02	0.00	

Fuente: Elaboración propia.

A causa de las cargas ambientales asociadas a la fase de construcción, toda nueva infraestructura de transporte partirá de una situación de déficit ambiental debido a esas cargas iniciales. La nueva LAV presentará una reducción neta de impactos ambientales una vez que haya compensado ese déficit inicial tras años de funcionamiento, al beneficiarse del desplazamiento de viajeros desde otros modos de transporte con mayores cargas ambientales. Para ello deben cumplirse dos condiciones: 1) el tráfico desplazado desde otros modos de transporte más contaminantes debe ser suficientemente grande; 2) el tráfico nuevo inducido por la nueva infraestructura (aquel que no existiría si la infraestructura no se construye) debe ser limitado, ya que da lugar a cargas ambientales suplementarias que juegan en contra del balance neto global de la infraestructura.

Cargas asociadas al transporte atraído por el AVE

$$\sum_{i=1}^n T_{i \rightarrow AVE}^i \cdot C^i$$

[5]

Para obtener el balance ambiental neto es necesario restar a las cargas de la construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura, todos aquellos ahorros en materia ambiental que puedan derivarse de su construcción. En este caso, un proyecto de esta naturaleza podrá atraer pasajeros de otros modos de transporte, lo que significa que esos pasajeros y sus cargas asociadas pasan ahora ser contabilizados en este modo de AV y deben restarse las cargas que tendrían asociadas en el escenario contrafactual. Es decir, son las cargas ambientales asociadas a los viajeros de otros modos de transporte en un escenario sin TAV que, ahora, en el escenario con TAV, se han desplazado al AVE.

Para obtener estas cargas se debe multiplicar el tráfico desplazado expresado en pkm por los coeficientes de impacto obtenidos de Ecoinvent (Tabla 3) para cada modo de transporte. Se han aplicado los porcentajes de tráfico desviado (Tabla 4) que para este corredor han utilizado Betancor y Llobet (2015).

TABLA 4
TRANSPORTE DESPLAZADO DE OTROS MODOS DE TRANSPORTE HACIA EL AVE.
ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE BETANCOR Y LLOBET (2015).

Transporte desplazado del avión (%)	Transporte desplazado del autobús (%)	Transporte desplazado del coche (%)	Transporte desplazado desde el tren convencional (%)	Transporte inducido (%)
%0.00	%5.00	%30.00	%35.00	%30.00

Descripción de los escenarios

El ACV del corredor Norte de AV ha sido realizado diseñando un escenario base de referencia donde se han adoptado ciertas suposiciones. En particular, este escenario asume que el vehículo particular más común es el diésel 5 y no el eléctrico, unos tráficos desplazados planteados por Betancor y Llobet, una tasa de ocupación del vehículo particular de 1.68 personas por vehículo basándonos en la encuesta del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2018), una demanda de tráfico estimada de 864 000 pasajeros al año y la combinación de producción eléctrica de España.

Para poder dar respuesta a la incertidumbre de alguna de esas variables consideradas, se han planteado cinco escenarios alternativos (E1-5). En cada uno de ellos, una de las variables asumidas en el escenario base se modifica para estudiar su influencia en los resultados. Los dos primeros escenarios (E1 y E2) estudian la influencia en los resultados de las nuevas políticas de movilidad que las instituciones promueven en materia de compartir vehículo/viaje. Estos escenarios analizan los resultados ambientales del TAV Norte si la tasa de ocupación de vehículo particular es mayor: de 2 p/v como reflejan Adra et al. (2010) y 3 p/v para el caso en que la tasa pueda ser el doble. El tercer escenario (E3) estudia los resultados posibles si la demanda de tráfico del corredor se duplica pero manteniendo la tasa de ocupación del vehículo a 1.68 personas por vehículo. El cuarto análisis de sensibilidad (E4) explora la opción de que el vehículo más común del parque de vehículos sea eléctrico con tasa de ocupación igual al escenario base. Y, por último, el quinto análisis de sensibilidad (E5) considera la opción del vehículo eléctrico con tasa de ocupación media de 3.36 personas por vehículo y la producción eléctrica totalmente renovable.

TABLA 5
BALANCE AMBIENTAL NETO DEL CORREDOR AVE NORTE.

	Tasa de ocupación del vehículo privado (personas por vehículo)	Demanda AVE	Tipo de coche	Producción eléctrica
Escenario base	1.68	Escenario base	56% diesel, 44% gasolina	España 2016
E1	2.52	Escenario base	56% diesel, 44% gasolina	España 2016
E2	3.36	Escenario base	56% diesel, 44% gasolina	España 2016
E3	1.68	100% mayor	56% diesel, 44% gasolina	España 2016
E4	1.68	Escenario base	Coche eléctrico	España 2016
E5	3.36	Escenario base	Coche eléctrico	100% renovable

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se exponen los resultados⁶ obtenidos con la modelización llevada a cabo para el escenario base y para cada uno de los escenarios alternativos planteados.

Escenario base

En la Tabla 4 se recogen los resultados resumidos del escenario base. Un resultado negativo en el balance ambiental neto corresponde a un beneficio en términos ambientales. Según la ecuación [3], un balance negativo implica que las cargas ambientales asociadas a la construcción, mantenimiento y funcionamiento de la línea AVE se compensan con las cargas evitadas que están vinculadas al transporte de pasajeros que se desplazan desde otros modos de transporte hacia el AVE. El balance neto de este corredor es de 15 kt CO₂eq al año, es decir que el proyecto de AV en el corredor norte no supone una mejora en emisiones totales de CO₂eq; al contrario, las aumenta de manera considerable. Como la mayoría de los impactos relacionados con la construcción y el mantenimiento de la infraestructura ocurren antes de que la línea se ponga en funcionamiento, cualquier nueva red de TAV comenzará con un déficit ambiental. Este déficit se irá compensando con los años si los impactos de la operación son menores que los impactos evitados en otros modos de transporte. El momento exacto en que comienzan estas compensaciones es una información crucial, especialmente con respecto al cumplimiento de los objetivos relacionados con las reducciones de emisiones y ahorro de energía. Bajo las condiciones de este escenario base se necesitarían más de 100 años para compensar el balance de todos los indicadores salvo el indicador de NMVOC (51 años).

Estos resultados se deben fundamentalmente a que la construcción y mantenimiento de la infraestructura llevan asociadas unas cargas ambientales altas y, al partir este proyecto con este déficit ambiental, la demanda de transporte juega un papel clave. La mejora ambiental se dará si la infraestructura es capaz de atraer a un gran número de viajeros de otros modos de transporte más contaminantes como el vehículo particular. En este caso, y bajo las condiciones del escenario base, este corredor necesitaría mover de 1 a 2 millones de pasajeros para que la línea norte del AVE suponga una mejora en términos de CO₂eq y de consumo energético CED.

⁶ Los resultados completos se pueden consultar contactando con los autores.

TABLA 6
BALANCE AMBIENTAL NETO DEL CORREDOR AVE NORTE.

Corredor Norte AVE	Calentamiento Global kt.CO ₂ eq·y ⁻¹	CED TJ·y ⁻¹	PM ₁₀ t·y ⁻¹	SO ₂ t·y ⁻¹	NO _x t·y ⁻¹	NMVOC t·y ⁻¹
Construcción y Mantenimiento	34.61	432.17	47.31	76.3	117.06	19.02
Operación (0.86 millones pasajeros)	10.92	317.21	11.92	51.3	34.77	2.32
Transporte desplazado	29.92	504.97	23.38	66.07	103.67	24.77
Impacto Neto	15.61	244.41	35.85	61.53	48.16	-3.43
Años necesarios para compensación	109.32	138.10	247.63	310.03	101.94	50.83

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de sensibilidad

La tasa de ocupación del vehículo particular es un dato muy sensible. En el escenario base se ha aplicado la tasa de 1,68 personas por vehículo que se da para España. Esa tasa de ocupación media podría variar en el tiempo de vida de la infraestructura y los esfuerzos institucionales se concentran en potenciar en la sociedad el compartir vehículo. Por lo tanto, si se incrementa esa tasa a 2 (E1) o incluso al doble (E2) manteniendo constante el número de viajeros de AV, todos los indicadores ambientales (Tabla 7) empeoran su plazo de compensación con respecto al escenario base. Es decir, no se dará la compensación de las cargas ambientales de construcción dentro de los 60 años de vida útil del proyecto. Esto se debe a que a mayor ocupación del vehículo particular menor será el impacto ambiental por persona y kilómetro de este modo de transporte privado. Ahora el hecho de atraer pasajeros al AVE desde el vehículo particular tiene menos efectos beneficiosos sobre el impacto ambiental neto de la línea norte de AV.

En tercer lugar, E3, la demanda de transporte de AV en el corredor norte para el año 2016 se ha estimado en 864 pasajeros en el escenario base. La línea hasta León y Zamora entró en funcionamiento a finales de 2015, es relativamente nueva y en un futuro, al extender el corredor hacia el noroeste y noreste de la península, es razonable pensar que el número de viajeros pueda aumentar. En este E3 se supone que la demanda de tráfico total de esta línea en un año pasa a ser el doble, es decir, 1.728 pasajeros y el resto de parámetros se mantienen como en el escenario base. Al considerar el doble de pasajeros es crucial analizar el origen de los mismos, es decir, no es lo mismo que ese aumento se produzca por desplazamiento de viajeros de otro modo de transporte hacia el AVE o que sea transporte nuevo, transporte inducido del AVE. Desde un punto de vista ambiental, el proyecto de AV es interesante si desplaza pasajeros de modos de transporte más contaminantes como el avión y el vehículo particular, hacia el TAV y así reducir los impactos ambientales netos del transporte, pero es lógico que todo proyecto nuevo genere una demanda nueva. Es importante analizar este balance entre transporte desplazado y transporte inducido de cara a poder determinar los impactos ambientales futuros de una línea nueva. Se observa que la línea Norte del AVE supondría una mejora en términos de CO₂eq y de CED si el transporte inducido es inferior al 34% y 26%, respectivamente, del total de los 1.728 pasajeros estimados para este escenario.

En cuarto lugar, E4, se ha supuesto la misma tasa de ocupación del vehículo (1,68 personas por vehículo) del escenario base pero planteando la opción que todos los vehículos particulares sean eléctricos. Es razonable plantearse una progresiva penetración de la electricidad en el sector automovilístico lo que puede conducir a unos impactos ambientales futuros menores en el transporte por carretera. La influencia de esta variable sobre los resultados anuales del AVE en esta línea es significativa, los plazos de amortización se disparan. Las cargas asociadas a la construcción, mantenimiento y operación del TAV no

varían con respecto al escenario base pero sí se reducen las cargas asociadas al transporte desplazado que en este caso serán menores al considerar el vehículo eléctrico. Si en la red de carreteras predomina el vehículo eléctrico con una tasa de ocupación de 1,5 personas/vehículo, el balance neto anual de este corredor será más o menos un 80% más de emisiones de CO₂eq que en el escenario base. O lo que es lo mismo, se necesitarían más de 300 años para que la línea norte del AVE suponga una mejora en términos de CO₂eq. El indicador de partículas PM₁₀ y el indicador de SO₂, son los únicos que experimentan mejora o se mantienen igual con respecto al escenario base.

Y, en quinto y último lugar, E5, se ha planteado el escenario más optimista de todos. Se ha considerado la idea de que el utilitario más común sea el eléctrico con tasa de ocupación de 3.36 personas/vehículo, y que además, la producción eléctrica sea de origen 100% renovable. En este caso, las cargas asociadas a la construcción y mantenimiento no cambian respecto al escenario base pero sí las asociadas a la fase de operación que disminuyen considerablemente ya que ahora la producción eléctrica es totalmente de origen renovable. Así, las emisiones de CO₂eq asociadas a la operación del tren ahora son casi un 20% menos que en el escenario base. Debido al uso generalizado del vehículo eléctrico y al origen renovable de esa electricidad, el ahorro en consumo energético CED y en emisiones de CO₂eq del transporte desplazado es mucho menor y por lo tanto las amortizaciones en años mayor. En concreto, la amortización de emisiones de CO₂eq se daría en 385 años y en 898 la del CED. La única reducción que se produce es en el indicador de SO₂ y esto se debe a la naturaleza renovable de la producción eléctrica del escenario.

TABLA 7
BALANCE AMBIENTAL NETO PARA CADA ESCENARIO EXPRESADO EN AÑOS
PARA COMPENSACIÓN.

	Calentamiento global	CED	PM ₁₀	SO ₂	NO _x	NM VOC
Años para compensación (Escenario base)	109	138	248	310	102	51
Años para compensación (E1)	179	340	452	4236	139	72
Años para compensación (E2)	263	1266	770	-794 ⁷	170	90
Años para compensación (E3)	55	69	124	155	51	25
Años para compensación (E4)	309	338	247	168	156	99
Años para compensación (E5)	385	898	474	253	171	150

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El cambio climático y la escasez de petróleo están recibiendo una atención cada vez más importante en políticas de transporte. En este contexto, el TAV a menudo se presenta como un modo de transporte sostenible, con gran potencial para el ahorro energético y reducción de emisiones de GEI y como medio para lograr la transición ecológica (SPRI, 2020). En este artículo, se evalúa el balance ambiental del Corredor Norte del AVE utilizando la metodología de ACV para condiciones de tráfico de 2016. Los resultados muestran que las cargas de construcción de este corredor de 77 t·km⁻¹·y⁻¹, no son desproporcionadas, permanecerían dentro del límite rango de cargas de construcción de Baron et al. (2011) que serían entre 79 y 270 t·km⁻¹·y⁻¹. Aunque estas cargas de construcción no son excesivas, el balance ambiental neto de este Corredor Norte en el escenario de referencia es desfavorable. Estos resultados se pueden trasladar a años de operación necesarios para compensar las cargas iniciales de construcción. Inicialmente, estos proyectos parten de un déficit ambiental que solo podrá ser compensados si la demanda de este TAV es suficientemente alta, viene de otros modos de transporte y no es demanda nueva. Así, tenemos que en el escenario base ningún indicador se compensa dentro de los 60 años de vida útil de la infraestructura (salvo

⁷ Nunca se dará amortización.

NMVOC en 51 años), esto es, las cargas iniciales de construcción de este corredor no se compensarán durante la vida útil del proyecto. Por lo tanto, lejos de suponer un ahorro en emisiones y consumo energético, la construcción de este corredor supone un empeoramiento ambiental y la construcción del Corredor Norte no estaría justificada en términos de ahorro de energía y de reducción de emisiones. En línea con los hallazgos sobre el análisis costo-beneficio, la decisión de construir nuevas secciones de AVE debería basarse en el análisis de la demanda para construir solo aquellas secciones que aseguren una alta demanda, es decir, construir solo aquellos corredores que conecten centros con alta densidad demográfica (De Rus,  1). Estas infraestructuras tienen un coste de oportunidad muy elevado y requieren muchos recursos que podrían destinarse a otras iniciativas. En el caso de este Corredor Norte, la demanda actual no es suficiente para amortizar esas cargas ambientales derivadas de su construcción y mantenimiento. La demanda debería ser, en el escenario base, un 55% mayor que la actual y eso implicaría unos riesgos de aumentar la demanda total de transporte y una degradación mayor del medio ambiente. En esta línea, el análisis de sensibilidad confirma que el factor principal que condiciona el balance ambiental neto es la densidad del transporte. La densidad del transporte servido por este corredor en 2016, medida en términos de pasajeros equivalentes en toda la distribución de la red (864  pasajeros) es mucho menor que el transporte servido por la red francesa (24 millones de personas), las redes japonesas (entre 20 y 99 millones), China (18 millones) y Taiwán (30 millones). Si se duplicara la cantidad de pasajeros, lo que no es muy probable a medio plazo, los resultados mejoran en todos los indicadores pero la amortización tampoco se daría dentro del plazo de la vida útil de la infraestructura. La naturaleza de este aumento en la demanda de transporte es un aspecto relevante que condiciona los resultados de manera crucial. Es esencial que este aumento en la demanda total del TAV no sea una nueva demanda inducida en su totalidad; de lo contrario, las consecuencias adversas para el medio ambiente aumentarán. En otras palabras, el resultado ambiental del TAV mejora si el tráfico se desvía de modos de transporte más contaminantes (coche, avión...) y el transporte inducido sigue siendo bajo. Este Corredor Norte no presenta la opción de transporte aéreo por lo que todos los beneficios ambientales vendrían del desplazamiento de pasajeros del coche hacia el TAV. Se puede observar en los resultados de este análisis que para que en términos de CO₂eq el proyecto suponga una mejora, la demanda inducida no debe ser superior al 34% de la demanda total, y algo parecido ocurre con el resto de indicadores.

Similares resultados medioambientales beneficiosos se pueden obtener mejorando otras variables del modelo de transporte de esta región, como puede ser la tasa de ocupación de los vehículos particulares, sin impulsar un TAV. El hecho de que se incentive a la sociedad a compartir vehículo reduciría las emisiones y aumentaría el ahorro energético. Los resultados serían mucho más favorables si el vehículo compartido fuera eléctrico y la producción eléctrica del país fuera 100% renovable, que son, a su vez, medidas y tendencias aplicables a no muy largo plazo.

En conclusión, este corredor Norte de TAV no contribuye a una mejora ambiental: primero, porque implica un mayor número de emisiones y consumo energético; segundo, porque las mejoras posibles vendrían de un crecimiento en la demanda del servicio lo que implicaría un transporte inducido; y tercero, porque existen alternativas en el transporte que mejoran las condiciones ambientales, como por ejemplo, la electrificación de los vehículos particulares o el incremento de la tasa de ocupación de los vehículos. La robustez de estos resultados nos lleva a concluir que la reducción de las emisiones contaminantes y el ahorro energético no deberían utilizarse como argumentos a favor de la inversión en el desarrollo de este corredor Norte de AV.

BIBLIOGRAFÍA

ADIF. (2020). *Adif—Líneas de alta velocidad*. ADIF Alta Velocidad. http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/lineas_de_alta_velocidad.shtml

- Adra, N., Michaux, J.-L., & André, M. (2010). *Analysis of the load factor and the empty running rate for road transport. Artemis—Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/277183200_Analysis_of_the_load_factor_and_the_empty_running_rate_for_road_transport_Artemis_-_assessment_and_reliability_of_transport_emission_models_and_inventory_systems
- Akerman, J. (2011). The role of high-speed rail in mitigating climate change – The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.12.004>
- Banar, M., & Özdemir, A. (2015). An evaluation of railway passenger transport in Turkey using life cycle assessment and life cycle cost methods. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 88-105. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.017>
- Barnes, E. (2014). California High Speed Resilience to Climate Change. En *Center for Earth Systems Engineering and Management*. <http://hdl.handle.net/2286/R.I.25239>
- Baron, T., Martinetti, G., & Pépion, D. (2011). *Carbon footprint of high speed rail*. International Union of Railways (UIC). <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1134978>
- Betancor, O., & Llobet, G. (2015). Contabilidad financiera y social de la alta velocidad en España. *FEDEA: Área de infraestructuras y Transportes*.
- Bueno, G., Hoyos, D., & Capellán-Pérez, I. (2017). Evaluating the environmental performance of the high speed rail project in the Basque Country, Spain. *Research in Transportation Economics*, 62, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.02.004>
- California High-Speed Rail Authority. (2016). *California High-Speed Rail Sustainability Report*. 54.
- Chang, B., & Kendall, A. (2011). Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California's high-speed rail system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(6), 429-434. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.004>
- Chester, M., & Horvath, A. (2010). Life-cycle assessment of high-speed rail: The case of California. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014003>
- Cornet, Y., Dudley, G., & Banister, D. (2017). High Speed Rail: Implications for carbon emissions and biodiversity. *Case Studies on Transport Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.08.007>
- Cour des Comptes. (2014). *La grande vitesse ferroviaire: Un modele porte au-dela de sa pertinence*. https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/20141023_rapport_grande_vitesse_ferroviaire.pdf
- Cuenot, F. (2016). Carbon Footprint of Railway Infrastructure: Comparing existing methodologies on typical corridors. *UIC-ETF*, 51.
- De Rus, G. (2011). The BCA of HSR: Should the Government Invest in High Speed Rail Infrastructure? *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 2(1), 1-28. <https://doi.org/10.2202/2152-2812.1058>
- Dorsey, B., Olsson, M., & Rew, L. J. (2015). Ecological Effects of Railways on Wildlife. En R. van der Ree, D. J. Smith, & C. Grilo (Eds.), *Handbook of Road Ecology* (pp. 219-227). John Wiley & Sons, Ltd. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118568170.ch26/summary>
- Enterate. (2018). *Mapa de trenes AVE España 2018 (líneas, rutas, destinos...)*. ENTERAT.COM. <http://www.enterat.com/servicios/mapa-ave-espana.php>
- European Commission. (1992). *Green Paper on the Impact of Transport on the Environment. A Community Strategy for «Sustainable Mobility»*. <http://aei.pitt.edu/1235/>

European Commission. (2011). *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050* (COM (2011) 112 final). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.

European Commission. (2013). *EU energy, transport and GHG emissions—Trends to 2050: Reference scenario 2013*. Luxembourg: European Commission.

European Court of Auditors. (2018). *A European high-speed rail network: Not a reality but an ineffective patchwork*. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_19/SR_HIGH_SPEED_RAIL_EN.pdf

European Environment Agency. (2018). *Transport: Increasing oil consumption and greenhouse gas emissions hamper EU progress towards environment and climate objectives*. European Environment Agency.

Galán, J., Alameda, D., & Abad, J. M. (2017, marzo 3). *AVE: Estas son las estaciones de alta velocidad más y menos utilizadas de España | Economía | EL PAÍS*. https://elpais.com/economia/2017/03/01/actualidad/1488362770_011434.html

García Álvarez, A. (2010). Energy Consumption and Emissions of High-Speed Trains. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2159, 27-35. <https://doi.org/10.3141/2159-04>

García, P. (2017, noviembre 12). *Las ocho estaciones del AVE en España con menos de 150 pasajeros al día*. El Independiente. <https://www.elindependiente.com/economia/2017/11/12/estaciones-ave-espana-menos-viajeros/>

Heather Jones, Filipe Moura, & Tiago Domingos. (2016, agosto 3). *Life cycle assessment of high-speed rail: A case study in Portugal*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/305820361_Life_cycle_assessment_of_high-speed_rail_a_case_study_in_Portugal

Jehanno, A., Palmer, D., & James, C. (2011). *High Speed Rail and Sustainability*. International Union of Railways, UIC. <http://old.uic.org/download.php/publication/531E.pdf>

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2018). *Anuario estadístico 2018. Capítulo 8. Tráfico*. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/08trafico_18.pdf

Observatorio del Ferrocarril en España. *Informe 2015*. (2016, diciembre). https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/2D6FF366-18BE-4D71-9C0B-DFA456575AFB/142179/Informe_OFE2015.pdf

SPRI. (2020, enero 22). *Tapia: "La Y vasca es el salto cualitativo más importante en la transición ecológica de nuestro país"*. SPRI. <https://www.spri.eus/es/infraestructuras-comunicacion/tapia-la-y-vasca-es-el-salto-cualitativo-mas-importante-en-la-transicion-ecologica-de-nuestro-pais/>

Tuchs Schmid, M., Knörr, W., Schacht, A., Mottschall, M., & Schmied, M. (2011). *Carbon Footprint and environmental impact of Railway Infrastructure*. International Union of Railways, UIC. https://uic.org/IMG/pdf/uic_rail_infrastructure_111104.pdf

Yue, Y., Wang, T., Liang, S., Yang, J., Hou, P., Qu, S., Zhou, J., Jia, X., Wang, H., & Xu, M. (2015). Life cycle assessment of High Speed Rail in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.005>

Zembri, P., & Libourel, E. (2017). Towards oversized high-speed rail systems? Some lessons from France and Spain. *Transportation Research Procedia*, 25, 368-385. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.414>

TABLA 1
INDICADORES AMBIENTALES.

Demanda de energía acumulada (CED)	Este indicador calcula todo el consumo energético directo e indirecto durante la vida del servicio, por lo que requiere analizar todas las fases del ciclo de vida. Es importante economizar en el consumo de energía ya que los combustibles fósiles como el petróleo y el gas no son inagotables. Unidad: MJ. Categorías de impacto relacionadas: Demanda de energía acumulada.
Dióxido de Carbono (CO2)	Estas emisiones provienen de la combustión de combustibles fósiles derivados de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) y van a la atmósfera convirtiéndose en la principal causa del efecto invernadero y el cambio climático. Provocan graves consecuencias en la biosfera y el bienestar de las generaciones futuras. Unidad: kilogramo Categorías de impacto relacionadas: Calentamiento Global.
Gases de efecto invernadero distintos del CO2	Estos son aquellos gases de efecto invernadero diferentes al dióxido de carbono, convertidos en su equivalente en dióxido de carbono: metano, óxido nitroso, ozono, clorofluorocarbonos... Este es el indicador que se utiliza para medir la huella de carbono de un individuo, organización, evento o producto. Unidad: kilogramo CO ₂ -eq Categorías de impacto relacionadas: Calentamiento Global.
Partículas sólidas (PM10)	Partículas en el aire, de menos de 10 micrómetros de diámetro y que no se depositan en el suelo de forma inmediata. En las últimas décadas, la cantidad de estas partículas en la atmósfera ha aumentado considerablemente debido a la actividad humana. A las partículas de origen natural, como el polen o el polvo del desierto, debemos sumar una amplia variedad de partículas de diferentes fuentes, una de ellas, el transporte. El riesgo para la salud humana es evidente y varía según el tamaño, la composición y el origen. Problemas respiratorios, irritaciones e incluso cáncer son las consecuencias más comunes. Unidad: gramo Categorías de impacto relacionadas: Toxicidad humana.
Dioxido de sulfuro (SO2)	Las emisiones de este gas se producen principalmente en industrias de alta temperatura y en la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles con azufre, como el petróleo y el carbón de baja calidad. Es una de las causas de la lluvia ácida porque al combinarse con la humedad del aire se forma ácido sulfúrico, que daña principalmente los bosques y la vida silvestre. Los principales efectos sobre la salud humana incluyen bronquitis y asma, entre otros. Unidad: gramo Categorías de impacto relacionadas: Acidificación, Toxicidad humana, Oxidación fotoquímica.
Compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC)	Los NMVOC son compuestos orgánicos en forma gaseosa que se vaporizan fácilmente y que están formados por hidrocarburos, por lo que el sector del transporte es uno de los sectores que más emisiones genera. Son peligrosos para la salud humana porque pueden ser cancerígenos y porque son los compuestos que producen ozono a nivel del suelo o smog fotoquímico. Unidad: gramo Categorías de impacto relacionadas: Ecotoxicidad, Toxicidad humana, Oxidación fotoquímica, deterioro de la capa de ozono.
Óxido de nitrógeno (NOx)	Estos gases son óxidos de nitrógeno y el principal contaminante es el dióxido de nitrógeno que se produce en los vehículos motorizados de combustión a alta temperatura y en las centrales eléctricas. Sus consecuencias en la salud humana van desde la irritación del tracto respiratorio hasta el daño irreversible de los pulmones tras exposiciones permanentes.. Unidad: gramo Categorías de impacto relacionadas: Acidificación, Toxicidad humana, Eutrofización.

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2
RESULTADOS DEL BALANCE AMBIENTAL DE AV DEL CORREDOR NORTE
EN TODOS LOS ESCENARIOS.

Corredor Norte AVE	Global Warming kt·y ⁻¹	CED TJ· y ⁻¹	PM ₁₀ t· y ⁻¹	 SO ₂ t· y ⁻¹	NO _x t· y ⁻¹	NMVOC t· y ⁻¹
Construcción Infraestructura	34.61	432.17	47.31	76.3	117.06	19.02
Operación (0.86 millones de pasajeros) (Base)	10.92	317.21	11.92	51.3	34.77	2.32
Transporte desplazado (Base)	29.91	504.96	23.38	66.07	103.67	24.77
Impacto Neto (Escenario Base)	15.61	244.41	35.85	61.53	48.16	-3.43
Impacto Neto (E1, 2.52 pasajeros coche)	23.02	355.93	41.03	75.22	66.56	3.06
Impacto Neto (E2, 3.36 pasajeros coche)	26.72	411.69	43.62	82.06	75.76	6.31
Impacto Neto (E3, doble demanda)	-3.38	56.65	24.38	46.77	-20.74	-25.88
Impacto Neto (E4, coche eléctrico)	27.88	355.49	35.80	49.06	71.96	7.48
Impacto Neto (E5, coche elec., ocupación alta, electricidad renovable.)	29.22	403.31	41.32	58.19	76.10	11.39
Transporte anual para impacto nulo (Escenario Base, Mp)	1.57	1.99	3.57	4.46	1.47	0.73
Transporte anual para impacto nulo (E1, Mp)	2.58	4.90	6.51	61.00	2.00	1.03
Transporte inducido para impacto nulo (E2, Mp)	3.79	18.23	11.08	-11.44	2.45	1.29
Transporte anual para impacto nulo (E3, %)	33.96	26.07	-6.49	5.23	37.00	66.58
Transporte anual para impacto nulo (E4, Mp)	4.44	4.87	3.55	2.42	2.24	1.42
Transporte anual para impacto nulo (E5, Mp)	5.55	12.94	6.82	3.64	2.47	2.15
Años para compensación (Escenario Base)	109	138	248	310	102	51
Años para compensación (E1)	179	340	452	4236	139	72
Años para compensación (E2)	263	1266	770	-794	170	90
Años para compensación (E3)	55	69	124	155	51	25
Años para compensación (E4)	309	338	247	168	156	99
Años para compensación (E5)	385	898	474	253	171	150

Fuente: Elaboración propia.