



Economía, sociedad y territorio

ISSN: 1405-8421

ISSN: 2448-6183

El Colegio Mexiquense A.C.

Guerrero Fernández, José Antonio; Obregón-Biosca, Saúl Antonio
Consumo energético y emisiones de GEI en Alta Velocidad
Ferroviaria, caso Guadalajara-Ciudad de México-Veracruz
Economía, sociedad y territorio, vol. XXIII, núm. 71, 2023, Enero-Abril, pp. 217-248
El Colegio Mexiquense A.C.

DOI: <https://doi.org/10.22136/est20231779>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11174470008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

UDEM [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Consumo energético y emisiones de GEI en Alta Velocidad Ferroviaria, caso Guadalajara-Ciudad de México-Veracruz

Energy consumption and GHG emissions in High-Speed Rail, Guadalajara-Mexico City-Veracruz case

JOSÉ ANTONIO GUERRERO FERNÁNDEZ*
SAÚL ANTONIO OBREGÓN-BIOSCA**

Abstract

Energy consumption is linked to greenhouse gases emission, and the transport sector contributes significantly to this. This research addresses the relevance of this phenomenon in high-speed rail projects, considering the original sources of electricity. As a case study, two transport corridors with high demand in Mexico were adopted: the first Mexico City-Guadalajara, and the second, Mexico City-Puerto de Veracruz. By including the high-speed train in these corridors, energy consumption decreases, while the gases emission into the atmosphere increases.

Keywords: *high speed train, economic evaluation, energy consumption, GHG emissions.*

Resumen

La emisión de gases de efecto invernadero y su relación con el consumo energético están ligados al sector transporte. La presente investigación aborda la relevancia de este fenómeno en los proyectos ferroviarios de alta velocidad al considerar las fuentes originarias de electricidad. Se usaron, como casos de estudio, dos corredores de transporte con alta demanda en México: el primero Ciudad de México-Guadalajara y, el segundo, Ciudad de México-Puerto de Veracruz. Al incluir al tren de alta velocidad en estos corredores, el consumo energético disminuye, mientras la emisión de gases a la atmósfera aumenta.

Palabras clave: tren de alta velocidad, evaluación económica, consumo de energía, emisiones de GEI.

* Construcción y proyectos en Grupo LET, Excelencia Ferroviaria, correo-e: jose.guerrero@let.com.mx

** Universidad Autónoma de Querétaro, correo-e: saul.obregon@uaq.mx

Introducción

El estudio del consumo energético está ligado de manera intrínseca al estudio de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), como se expone en Campos Robledo y Olivares (2013), y es el transporte una de las actividades que mayor aporte otorgan en ambos fenómenos. A nivel mundial, de acuerdo con la IEA (2020), a esta praxis se le atribuye 38% del consumo de energía y 37% de las emisiones de GEI. México excede esta media mundial, ya que el sector transporte consume 46% de la energía producida (Montoya Martín del Campo *et al.*, 2019) y aporta 42% de las emisiones de GEI (Sheinbaum-Pardo y Chávez-Baeza, 2011).

Algunos de los principales combustibles precursores de la energía son, de mayor a menor, los hidrocarburos, el carbón, las fuentes hidroeléctricas, la energía nuclear y, por último, la energía geotérmica, eólica, solar y la biomasa, en similares proporciones (EIA, 2019). De acuerdo a Benavides Ballesteros y León Aristizabal (2007), los principales GEI son el vapor de agua (H_2O), el ozono (O_3), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4), estos tres últimos, según lo expuesto por Sotelo Navalpotro *et al.* (2011), son los que la actividad del transporte emite en mayor proporción, lo cual da sustento a la evaluación y seguimiento de la sostenibilidad de este sector, desde el punto de vista económico, ambiental y social.

Actualmente, el Sistema Ferroviario Mexicano (SFM) cuenta con 18,000 km de ruta repartidos, desde 1995, entre siete empresas concesionarias (FIT, 2014; Ramírez Carmona *et al.*, 2022). De acuerdo al FIT (2014), desde 1995 y hasta el 2014, el tráfico ferroviario en México se ha duplicado gracias a las mejoras continuas y calidad de la gestión en la infraestructura, asimismo, el Producto Interno Bruto (PIB) tuvo un incremento de 56 por ciento.

Numerosos estudios han comparado el consumo energético y la emisión de GEI del tren de alta velocidad (TAV) con el autotransporte, el avión y, en algunos casos, con el tren convencional. Por ejemplo, en García Álvarez (2008) se aborda el caso de España, al igual que en Martínez Acevedo e Iglesias Díaz (2018), donde además se incluyen experiencias de Alemania, Francia y Japón. En Xujie Feng y Lu Liu (2014) se evalúa el consumo energético del TAV en China. Para el caso de México, en Herrera-García y Sánchez-López (2015) se exponen los ahorros energéticos y la reducción de GEI al implementar hipotéticas líneas de alta velocidad en diversos corredores de transporte, mientras que en Modelística (2014) se mencionan los ahorros económicos obtenidos al implementar teóricamente una línea de alta velocidad ferroviaria (LAV) entre la Ciudad de México y Querétaro.

En García Álvarez (2008) y Martínez Acevedo e Iglesias Díaz (2018) se obtienen cuantías menores para la LAV sobre los otros modos de transporte, al dividir la cantidad de energía consumida y de GEI emitidos entre el número de pasajeros transportados. En Xujie Feng y Lu Liu (2014), el consumo energético resulta más eficiente para los viajes sin paradas intermedias. Sin embargo, en estos tres estudios no se considera el combustible empleado para crear la electricidad que utiliza la tracción en los TAV, con lo cual, el análisis de las emisiones de GEI es trunco. En los dos estudios mencionados sobre los posibles casos de LAV mexicanas esta situación se repite, además, en Modelística, el costo unitario por tonelada de GEI emitida corresponde a la valoración española.

Essen *et al.* (2020) define una metodología que evalúa los costos de la contaminación aérea para cinco medios de transporte—incluidos los tres medios terrestres considerados en este estudio— para 28 países de la Unión Europea; mientras que Holvad *et al.* (2016) recopila las iniciativas que tomó la Comisión Europea para migrar a los usuarios de los modos carretero y aéreo hacia los modos ferroviario y marítimo, a los que denomina más ecológicos. Si bien los trabajos aportan un valioso y acertado acervo de conocimiento que favorece la implementación de las LAV, y sirven de fuente de información para la actual investigación, es necesario profundizar sobre las fuentes de energía y sus correspondientes emisiones de GEI, con el objetivo de valorar el impacto económico conjunto, para fortalecer las evaluaciones de proyectos de alta velocidad en la oferta de transporte.

Por lo anterior, al considerar las fuentes de energía y respectivas emisiones de GEI, este trabajo presenta una propuesta de evaluación económica en el consumo y las emisiones aplicada en dos escenarios: el actual, con la oferta de transporte existente, y el hipotético, donde se considera una LAV para dos corredores de transporte mexicanos, el primero entre la Ciudad de México (CDMX) y Guadalajara (GDL), con dos alternativas de recorrido, una por La Piedad (LPD) y otra por León (LEÓN), y el segundo entre CDMX y el Puerto de Veracruz (VER). Se consideró como año de estudio al 2013, por ser el más reciente con datos económicos completos reportado por Inegi (2020).

1. Marco teórico

A principios de la década de los ochenta, con la experiencia que se tenía en ese momento respecto a la implementación de LAV, Alias (1984) concluyó que los TAV son apropiados para implementarse en corredores con gran demanda de viajes, de longitud media o larga, en competencia con el autotransporte y el transporte aéreo. Este criterio sentó las bases para

definir los puntos urbanos aptos para enlazarse con una LAV; posteriormente, Gutiérrez Puebla (2004) determinó que la ubicación de las estaciones de la LAV debe obedecer a parámetros de carácter espacial, donde se logren distancias que permitan alcanzar la velocidad ofrecida por este medio de transporte¹ y se considere la correspondiente longitud de frenado. Por ello, propone su factibilidad cuando la separación entre estaciones intermedias ronda entre 100 y 500 kilómetros.

En López-Pita (2014) se explora la necesidad de las LAV y su justificación espacial; relaciona los tiempos de viaje puerta a puerta² logrados por el TAV, el autotransporte, el avión y el tren convencional, con las distancias recorridas por cada medio. Concluye que el TAV, en viajes que consumen entre una hora y poco más de tres, recorre distancias de 75 y 600 kilómetros, respectivamente, lo que derivó en una mayor atracción para los usuarios.

Respecto al consumo energético y sus correspondientes emisiones de GEI en el transporte aéreo, en Wolf y Simon (1984) se reporta el fenómeno del consumo energético y, al utilizar el caso particular de los vuelos entre las ciudades de Colonia y Hanover, obtiene que es proporcional al peso de avión y la distancia recorrida; en Larsson *et al.* (2018) se analizaron las emisiones de GEI para el caso de Suecia y se obtuvo que, en aviación civil, la cantidad de GEI por pasajero en vuelos internacionales se incrementó 6%, desde 1990 hasta 2014, lo que alcanzó una cantidad similar a lo que produjeron los autos en todo aquel país, en el último año del periodo.

Por otro lado, para el transporte ferroviario de alta velocidad, en Xujie Feng y Lu Liu (2014) se obtuvieron los consumos de energía correspondientes a un tren con una masa de 536 toneladas que se desplaza a diversas velocidades en China, pero no se mencionó a la emisión de GEI. En García Álvarez (2008) se hizo una comparativa de los dos fenómenos entre el TAV, el avión, los vehículos automotores y el tren convencional para tres corredores en España; resultó, en todos los casos, que el TAV logra una mayor eficiencia energética con menor cantidad de emisiones a la atmósfera, por pasajero transportado.

Para las emisiones de GEI, Essen *et al.* (2020), en un documento de uso general en la Unión Europea, definen una metodología para obtener los costos promedio y totales causados por éstas para cinco distintos modos de transporte, incluido el tren convencional y el TAV. Primero, obtiene la cantidad total de emisiones: utiliza dos datos de entrada para cada tipo de vehículo, su factor de emisión y su desempeño; ésta se afecta por un

¹ Por definición, un TAV es aquél que alcanza velocidades de operación promedio de al menos 200 km/h, de acuerdo con la UIC (2018).

² Este tiempo se refiere a la suma del tiempo de viaje en el vehículo más los tiempos consumidos en las terminales, el acceso, la espera y el egreso.

tercer dato de entrada: el factor de costo, con lo que resulta el costo total de la contaminación del aire, por modo de transporte; finalmente, reparte este resultado entre los pasajeros-kilómetro o las toneladas-kilómetro servidas por cada uno de éstos.

Para estimar el consumo energético en el autotransporte mexicano, Solís Ávila y Sheinbaum-Pardo (2016) definen una metodología, en ésta se involucra a la cantidad de vehículos, distancia recorrida, intensidad y poder calorífico del combustible empleado. El método de la ICAO (2018) opera de manera similar, pero para el transporte aéreo; tabula el consumo energético al utilizar como datos de entrada el tipo de aeronave y la distancia recorrida. La energía consumida por los TAV se reporta en Xujie Feng y Lu Liu (2014), donde se evalúa este fenómeno para un tren de masa constante transitando a distintas velocidades; en este estudio se obtienen los megajulios (MJ) de energía consumidos para cada caso.

Los resultados obtenidos por estos tres últimos métodos pueden utilizarse en el criterio de IPCC (2006; 2014). Al multiplicar cada uno de ellos por su correspondiente factor de emisión, se obtiene la cantidad de GEI emitidas a la atmósfera por cada modo de transporte.

En relación con el impacto a la calidad del aire que los proyectos TAV representan respecto a otros modos de transporte, se cuenta con los resultados que muestran Essen *et al.* (2020) al evaluar los modos de transporte terrestre; obtienen los siguientes costos promedio de 28 países de la Unión Europea, por la emisión de GEI, diferenciando entre transporte de pasajeros y mercancías: para el modo ferroviario,³ 0.812 €/pkm y 0.684 t/pkm; para el modo carretero, 3.32 €/pkm y 5.44 €/tkm. Respecto al transporte aéreo, se limita al transporte de pasajeros y reporta 2.46 €/pax en promedio de tres tipos de viaje, mayor a 5000 km, entre 1500 y 5000 km, y menor a 1500 km. Esta comparativa económica deja de manifiesto el beneficio en la menor emisión de GEI que presenta el TAV con relación a los otros dos modos de transporte.

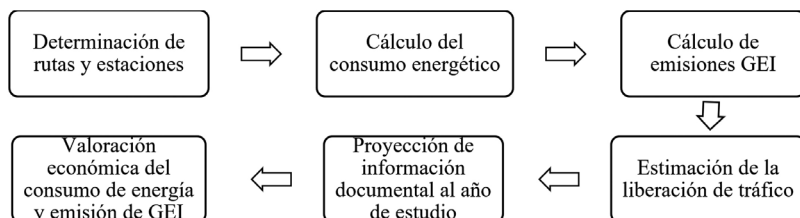
2. Metodología y materiales

La presente investigación se llevó a cabo mediante seis pasos, los cuales se exponen brevemente en la figura 1. Una vez que se determinaron las rutas y estaciones para los casos de estudio en este trabajo, el resto de la metodología se dedujo a partir de la secuencia lógica que realizaron Sheinbaum-Pardo y Chávez-Baeza (2011), así como Solís Ávila y Sheinbaum-Pardo (2016).

³ Incluye TAV y trenes convencionales.

Con el mismo orden de la secuencia mostrada en la figura 1, se explica cada uno de los pasos que la conforman.

Figura 1
Secuencia de la investigación



Fuente: elaboración propia.

2.1. Determinación de las rutas y estaciones

Se comenzó definiendo las rutas factibles para contar con una LAV, así como los puntos aptos para emplazar sus estaciones. Se retomó la ruta propuesta en Mendoza-Sánchez y Téllez-Gutiérrez (2006), Guadalajara-Ciudad de México-Puebla, prolongándola hasta el Puerto de Veracruz, de acuerdo a Herrera-García y Sánchez-López (2015). Se le aplicó el criterio de Alias (1984), quien acota las rutas probables a aquéllas que tengan una gran demanda de usuarios, para lo cual se revisaron los aforos vehiculares de SCT (2018a). Las estaciones intermedias se definieron mediante Gutiérrez-Puebla (2004) y López-Pita (2014), quienes indican una separación mínima que ronda entre 100 y 200 kilómetros.

De Herrera-García y Sánchez-López (2015) se obtuvo la distancia ferroviaria entre nodos extremos, y se relacionó con su correspondiente distancia carretera, obtenida mediante SCT (2019); esta distancia total se desagregó, considerando un abatimiento de curvatura⁴ de la carretera a la LAV, de manera proporcional, para determinar la de los tramos intermedios.

Una vez definidas las rutas terrestres se obtuvo la distancia recorrida por el transporte aéreo para los nodos extremos de éstas; se consideró la distancia ortodrómica –es decir, el camino más corto entre dos puntos sobre la superficie terrestre (Barreno Ripoll *et al.*, 2008)– entre los pares origen-destino. Los lectores interesados en el tema pueden encontrar en la citada referencia la ecuación para obtener esta distancia.

⁴ Las LAV se aproximan a la forma rectilínea en mayor proporción que las carreteras (López-Pita, 2014). Entonces, el factor de abatimiento de curvatura se obtuvo al dividir la distancia ferroviaria de alta velocidad (Herrera-García y Sánchez-López, 2015) entre su correspondiente distancia carretera (SCT, 2019).

2.2. El consumo energético

El consumo energético en el autotransporte se calculó con el proceso reportado en Solís-Ávila y Sheinbaum-Pardo (2016), que desagrega al modo carretero en sus diversos submodos, mediante la ecuación 1.

$$E_t = \sum [V_{ijt} \cdot D_{ijt} \cdot I_{ijt} \cdot Pc_{ijt}] \quad (1)$$

Donde E es el consumo energético total del autotransporte en el año t , en megajulios [MJ], V_{ijt} es la cantidad de vehículos del tipo i que utilizan el combustible j , D_{ijt} es la distancia recorrida, en km, I_{ijt} es la intensidad de combustible del vehículo, en lt/km, y Pc_{ijt} representa el poder calorífico del combustible j considerado, en MJ/lt.

El número de vehículos y su tipología se obtuvieron de la información reportada en SCT (2018a), donde se desagregan por su clasificación vehicular en tipo A (automóviles y utilitarios), tipo B (autobuses de pasajeros) y tipo C (vehículos de carga en sus diversas configuraciones). Las estaciones de aforo empleadas correspondieron a las localizadas en las carreteras federales que recomienda la aplicación de la SCT (2019) para cada trayecto, a la vez se consideraron los orígenes y destinos de la información reportada en SCT (2013).

Con lo reportado en Cadengo Ramírez *et al.* (2018) se determinó la proporción vehicular por tipo de combustible. De manera que de la totalidad de vehículos considerados se encontró que, a gasolina, opera 97.01% del tipo A, 18.72% del tipo B y 10.27% del tipo C; y a diésel el complemento. Estas proporciones se tomaron íntegras de la bibliografía previamente mencionada, donde se consideró el correspondiente margen de confianza estadístico para las variaciones a lo largo del tiempo. Para determinar el rendimiento de combustible de acuerdo a lo expuesto en Cadengo Ramírez *et al.* (2018), se ponderaron los rendimientos para cada tipo de vehículo, en conjunto con la información reportada en Sheinbaum-Pardo y Chávez-Baeza (2011). El poder calorífico de cada combustible se consideró según lo reportado por la Conuee (2020).

Para la obtención del consumo energético en el transporte aéreo se empleó el criterio de la ICAO (2018), en función del tipo de aeronave y la distancia del vuelo considerado. El cuadro 1 muestra un extracto de la información presentada por ICAO. Para la elección de las aeronaves se consideraron los modelos de aeronaves que utilizan las aerolíneas en los puentes aéreos en los corredores analizados, de acuerdo a plataformas digitales de acceso público: Expedia (2019), Aeromar (2019), Aeroméxico (2019), Interjet (2019),⁵ Viva Aerobus (2019) y Volaris (2019).

⁵ Interjet detuvo operaciones en 2020.

Cuadro 1
Consumo de combustible (kg) para distintas aeronaves

	<i>Distancia de vuelo (km)</i>	
	231.5	463.0
Airbus A319	1596	3259
Airbus A320	1672	3430
Airbus A321	1909	3925
Boeing 737-700	1695	3439
Boeing 737-800	1715	3494
Aerospatiale/Alenia ATR 72	434	891
Aerospatiale/Alenia ATR 72-500	413	843
Embraer 170	1075	2160
Embraer 190	1338	2688

Fuente: ICAO (2018).

El número de vuelos que realizan el viaje directo entre nodos extremos de cada ruta estudiada también se obtuvo de Expedia (2019), se consideró la tasa de variación de las operaciones aéreas que se registraron en el periodo comprendido entre 1991 y 2017, reportadas en SCT (2018b). De acuerdo con Oiltanking (2020), el poder calorífico en la gasolina de aviación (avgas) fue de 43.50 MJ/kg, mientras que en el combustible de turbina (avtur) fue de 43.02 MJ/kg., valores que se adoptaron en la presente investigación para obtener la energía liberada.

La tracción del TAV se logra a través de la fuerza de locomotoras eléctricas, que son alimentadas con energía producida en plantas de combustión estacionaria. La producción de energía eléctrica en México fue reformada en el 2012, priorizando a las fuentes renovables para su generación. En el año previo a la implementación de la reforma, de acuerdo con Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso (2012), 75.01% de esta energía se generó a partir de hidrocarburos, 6.23% a partir del carbón, 3.58% por reacción nuclear y 15.18% mediante precursores renovables.⁶ Siete años después de la reforma, de acuerdo a Montoya Martín del Campo *et al.* (2019), 82.87% de la energía eléctrica en México se produjo por hidrocarburos; 4.31% por carbón y 10.41% por precursores renovables.

En el presente trabajo se adoptaron los valores reportados en Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso (2012), ya que, aunque son previos a la reforma, indican una mayor producción de energía a partir de fuentes

⁶ Hidroenergía, geoenergía, solar, eólica, biogás y biomasa (Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso, 2012; Montoya Martín del Campo *et al.*, 2019).

renovables. Para determinar la cantidad de energía consumida por los TAV al realizar cada recorrido se consideró lo reportado en Xuji Feng y Lu Liu (2014), donde se expone que cuando el tren opera a una velocidad promedio de 240 km/h se consumen 0.20 MJ/t-km, y 0.15 MJ/t-km, para los viajes de corto itinerario y directos, respectivamente. En Xuji Feng y Lu Liu (2014) se modelizó como variable aleatoria a la velocidad, en un rango que va desde 200 km/h y hasta los 360 km/h. Sin embargo, en apego a la definición de UIC (2018), y a la experiencia previa de Modelística (2014), adaptada a la orografía mexicana, en el presente trabajo se consideró una velocidad de operación promedio para el TAV de 240 km/h que, de acuerdo con Nishijima *et al.* (2013), requerirá 300 km/h como velocidad de proyecto.

2.3. Las emisiones de GEI

Las emisiones de GEI se calcularon de acuerdo con lo propuesto en IPCC (2006; 2014) a través de la ecuación 2, donde GEI_t representa la cantidad total de gases efecto invernadero emitidos, en kg, en el año t , E_{st} es la energía consumida por el modo s , en tJ, y F es el factor de emisión por unidad energética, en kg/tJ, dado por el combustible j .

$$GEI_t = \sum [E_{st} \cdot F_j] \quad (2)$$

Respecto a los factores de emisión en el caso del autotransporte, en IPCC (2006) se recomienda considerar 69,300 kg/tJ para gasolina y 74,100 kg/tJ para diésel, cuando el CO₂ sea el gas por cuantificar. Para este medio de transporte, de acuerdo a IPCC (2014), únicamente se consideraron las emisiones de este gas, puesto que las de CH₄ y de N₂O resultan menores a 2% del total. Otros tipos de combustible, como el gas LP y el gas natural, se descartaron por su bajo porcentaje de participación en el consumo del autotransporte a nivel nacional, de acuerdo con Sheinbaum-Pardo y Chávez-Baeza (2011).

Para el transporte aéreo, IPCC (2006) indica los factores de emisión de CO₂ para el avgas: 70,000 kg/tJ y para el avtur: 71,500 kg/tJ; para obtener el de CH₄ y de N₂O se multiplicó el factor de emisión de CO₂ por 0.5 y 2, respectivamente.

Respecto al TAV, que se alimenta por electricidad, en Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso (2012) no se especifica el tipo de hidrocarburos o carbón utilizados para generar este fluido, por lo tanto, se adoptó el promedio de los factores que indica IPCC (2006) correspondientes a cada categoría de combustible. Para el CO₂, en el caso de los hidrocarburos, resultó 83,363 kg/tJ, y para los distintos carbones, 101,267 kg/tJ. Respecto

al CH_4 y el N_2O , se empleó el factor de 333,452 kg/tJ, y de 3,949,413 kg/tJ, respectivamente. Los demás combustibles precursores mencionados, de acuerdo a IPCC, no aportan GEI a la atmósfera.

2.4. La liberación de tráfico en los medios existentes

La cantidad de trenes en cada tipo de viaje se determinó con base en el número de usuarios atendidos y en la cantidad de carga transportada. Se asume que los trenes utilizados serán tipo Renfe Serie 112, con capacidad de 365 plazas para pasajeros (*Vía Libre*, 2009). El número de usuarios atendidos por el tren de alta velocidad considera: *i*) los viajeros atraídos, es decir aquellos usuarios que migraron de algún modo existente al nuevo, y *ii*) los viajeros inducidos, aquéllos que no realizaban el viaje, pero lo hicieron motivados por la existencia del tren de alta velocidad en la oferta de servicios.

Los viajeros y el tonelaje promedio transportados en cada corredor se obtuvieron de SCT (2013) y SCT (2018b) para el año de referencia, sin embargo, cuando no se encontró información disponible para el periodo específico estudiado se empleó el criterio del crecimiento geométrico —como se explica en el apartado 2.5.— para proyectar la información del año deseado con la tasa de crecimiento reportada en dichas fuentes, o bien, calculada a partir de dos años con información conocida. Si bien la demanda es un parámetro crítico en este estudio, no se realizó un análisis de sensibilidad debido a que su valor se toma de los datos que obtuvo SCT a partir de conteos físicos directamente en campo.

Por un lado, la cantidad de viajeros atraídos hacia la LAV se obtuvo de los resultados de la encuesta de preferencias declaradas, realizada por Modelística (2014), donde se menciona que migran hacia el TAV 17% de los viajeros en vehículos tipo A y 8.04% de los viajeros en los vehículos tipo B. El porcentaje de pasajeros del transporte aéreo que migrarán al TAV se obtuvo de la estimación reportada por Herrera-García y Sánchez-López (2015), esto es, 17.44%. Por el otro, los viajeros inducidos por la LAV representan 10% de los viajes atraídos, de acuerdo a Fernández Jáñez (2012) y García Álvarez (2016).

La cantidad de carga que se transporta en el TAV, en lugar de hacerlo por el medio convencional, se estimó con base en la experiencia de Liang *et al.* (2016), quienes encontraron que, para el caso de Alemania, Francia y China, la oferta de LAV en los corredores de transporte desvía entre 5 y 15% de la carga transportada, consistente en carga consolidada y mensajería proveniente de los medios convencionales. Si bien, además de la referencia mencionada no se encontró más evidencia para estas proporciones, en el presente artículo se adoptó un promedio de estos valores, a

pesar de que México tiene una vocación mayoritariamente de carga para los ferrocarriles, respecto a otros países (Ramírez Carmona *et al.*, 2022).

Klein y Smart (2017) y Liang *et al.* (2016) establecen que el número de viajeros y el tonelaje de la carga transportada es directamente proporcional a la cantidad de vehículos que circulan en los arcos estudiados. Esta premisa se utilizó para determinar la reducción del aforo vehicular y de las operaciones aéreas provocada por la inclusión del servicio ferroviario de alta velocidad en los corredores, y estimar así la disminución de vehículos en ambos medios.

2.5. La proyección de la información

Debido a que el presente estudio se realizó para el 2013 —el más reciente con censo económico reportado por Inegi (2020)— y a que no se encontró información sobre la cantidad de vehículos para todos los pares origen-destino estudiados en este año específico, se proyectó la cantidad del año disponible con la conocida expresión para poblaciones proyecto de crecimiento geométrico.

2.6. La valoración económica del consumo energético y las emisiones de GEI

Se realizó una comparación en pesos mexicanos de los consumos energéticos y de emisión de gases de efecto invernadero entre el escenario existente y el hipotético para evaluar cuál de los dos presenta el esquema menos oneroso. Para el caso del autotransporte se calculó un promedio de los valores mensuales reportados en la base de datos de El INPC (2020), donde el precio promedio al público del diésel y las gasolinas fue de \$0.33 por cada megajulio. En el transporte aéreo, a partir de Indexmundi (2020), se obtuvo un precio promedio por litro, tanto del avgas como del avtur, de \$0.28 por cada megajulio. El precio de la electricidad en México al incluir el TAV en el criterio de consumo industrial, de acuerdo a Imco (2013), se consideró \$0.41 por megajulio.

Para tasar las emisiones de GEI se utilizó el valor reportado por Cartes Mena (2018); se presentaron las experiencias de varios países en diversos años para asignar un precio a la tonelada métrica de gases efecto invernadero emitidos. En el caso de México, para el año en estudio, este valor fue de \$38.28 por cada tonelada de GEI.

3. Resultados

3.1. Los corredores en estudio y las distancias de recorrido

De acuerdo con Guerrero Fernández y Kato-Vidal (2022) se definieron las rutas para el caso de estudio y localidades donde se debe emplazar a una estación; estas localidades intermedias cumplen el criterio espacial para el emplazamiento de estaciones LAV mencionadas en Alias (1984), Gutiérrez Puebla (2004) y López-Pita (2014); además, son de vital importancia para la actividad económica del país y su vocación productiva es diversa, como puede verse en Guerrero Fernández y Kato-Vidal (2022).

La distancia de la LAV que separa los nodos extremos de cada ruta se obtuvo de Herrera-García y Sánchez-López (2015) y se dividió entre la distancia carretera obtenida de SCT (2019). Esto resultó en el factor de abatimiento de curvatura que se empleó para determinar la longitud de la LAV entre nodos intermedios; con la información de las distancias carreteras y LAV se formaron diagramas unifilares para cada ruta. Los lectores interesados en estos resultados los pueden encontrar en Guerrero Fernández y Kato-Vidal (2022), donde se muestran a detalle.

Para la longitud recorrida por los aviones, se obtuvieron las distancias ortodrómicas mediante las ecuaciones de Barreno Ripoll *et al.* (2008), los resultados se tomaron de Guerrero Fernández y Kato-Vidal (2022). Los lectores interesados pueden consultar en estas bibliografías la metodología y valores obtenidos.

3.2. El consumo energético y las emisiones de GEI

En la presente investigación se identificaron dos categorías de viaje: *i*) viajes de corto itinerario, entre los nodos extremos de cada ruta y su nodo intermedio más cercano, o bien entre dos nodos intermedios, siempre y cuando sean inmediatos; y *ii*) viajes de itinerario completo, entre los nodos extremos de cada ruta considerada. Para cada categoría se formaron dos escenarios: el actual, que considera a los medios de transporte realmente ofrecidos a los usuarios; y el hipotético, que se conforma al incluir el TAV en los servicios disponibles a los usuarios. Debido a las distancias en cada categoría de viaje, para los de corto itinerario el TAV representa competencia con el autotransporte, y para los directos lo hace, además, con el transporte aéreo.

3.2.1. Viajes de corto itinerario

En el escenario actual, en primer lugar, se cuantificaron los vehículos según su tipología en cada arco, de acuerdo al tipo de combustible que cada tipo vehicular utiliza (Cadengo Rodríguez *et al.*, 2018); en el segundo paso, mediante la ecuación 1, se estimó la cantidad de energía consumida por cada tipo de vehículo en cada arco; el tercer paso consistió en obtener la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero que genera el auto-transporte; en el cuarto paso se estimó la ponderación económica que adiciona el consumo energético y las emisiones de GEI.

En el escenario hipotético se cuantificaron los trenes de alta velocidad requeridos para prestar el servicio en los viajes de corto itinerario, lo cual, asimismo, conllevó cuatro pasos: *i)* la obtención de la cantidad de personas y toneladas transportadas en cada arco, de acuerdo a los promedios de ocupación para cada tipo de vehículo reportados por SCT (2013); *ii)* el cálculo de la cantidad de viajeros que migrarían y serían atraídos al TAV al adoptar los porcentajes indicados por Modelística (2014), Fernández Jáñez (2012) y García Álvarez (2016); *iii)* la estimación de la cantidad de toneladas que serán transportadas por el TAV, de acuerdo a lo reportado en Liang *et al.* (2016), y *iv)* la obtención del total de trenes requeridos en cada arco al dividir la cantidad de viajeros y de carga entre la capacidad de cada tren.

Debido a que se tomó un año único para el caso de estudio, el crecimiento en la demanda y la vida útil de los vehículos no se consideró. El cuadro 2 muestra la comparativa de aforos vehiculares entre el escenario actual y el hipotético, observándose que la cantidad de vehículos se reduce tras la inclusión del TAV.

El consumo energético se analizó para cada par origen-destino de corto itinerario, así como para cada uno de los tres tipos de vehículo y su carburante. En el escenario hipotético, en el modo ferroviario de alta velocidad, se incluyó la energía consumida por los trenes de pasajeros y por los de carga, debido a que la masa desplazada por cada uno de éstos es distinta.

La gráfica 1 muestra los resultados obtenidos del consumo energético para todos los arcos en los viajes de corto itinerario. En el escenario actual, en la ruta GDL-CDMX, el par GDL-LPD reportó un consumo energético de 0.53 PJ. La desagregación del cálculo de este total indicó que los vehículos tipo A consumieron 53%, los tipo B, 21% y los tipo C, 26%. En el par LPD-QRO se consumió un total de 3.49 PJ de energía, donde el tipo A participó con 56%, el tipo B, con 14% y el tipo C, con 30 por ciento.

En el par GDL-LEÓN se consumieron 3.36 PJ de energía, los vehículos tipo A participaron con 57%, los vehículos tipo B, con 19% y los tipo C, con 24%. Respecto al par LEÓN-QRO, se observó un consumo

Cuadro 2
 Aforos vehiculares, viajes de corto itinerario, 2013

Par	Tipo de vehículo	Escenario actual	Escenario hipotético	Par	Tipo de vehículo	Escenario actual	Escenario hipotético
GDL-LPD	A	459,999	381,799	QRO-CDMX	A	13,669,894	11,346,012
	B	58,492	53,795		B	907,465	834,596
	C	67,573	60,816		C	3,645,305	3,280,775
	TAV	—	1018		TAV	—	33,609
LPD-QRO	A	2,898,301	2,405,590	CDMX-PUE	A	21,414,170	17,773,761
	B	227,318	209,064		B	565,472	520,065
	C	463,728	417,355		C	654,328	588,895
	TAV	—	6074		TAV	—	32,424
GDL-LEÓN	A	2,443,719	2,028,287	PUE-COR	A	4,625,602	3,839,250
	B	256,497	235,900		B	435,595	400,617
	C	297,537	267,783		C	500,455	450,409
	TAV	—	4934		TAV	—	9622
LEÓN-QRO	A	2,855,925	2,370,417	COR-VER	A	1,124,078	932,984
	B	223,994	206,007		B	152,417	140,178
	C	456,948	411,253		C	176,331	158,698
	TAV	—	5941		TAV	—	2794

Fuente: elaboración propia con datos de SCT (2018a; 2018b) y Expedia (2019).

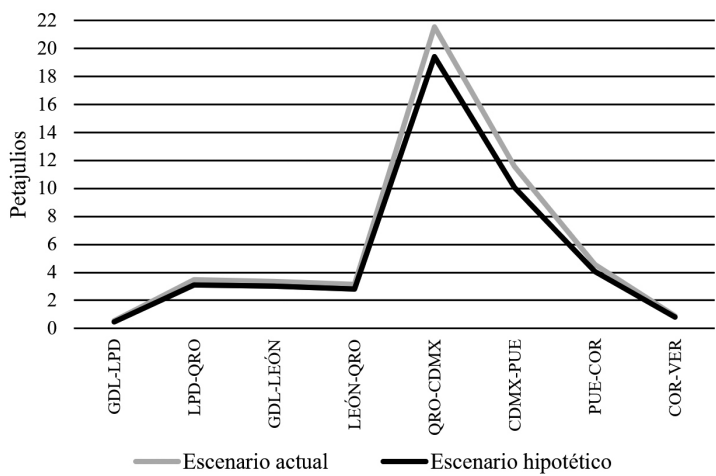
energético de 3.13 PJ, valor que resultó muy similar al otro arco que confluye en Querétaro, y con una participación porcentual por tipo de vehículo idéntica a ésta.

Finalmente, el par QRO-CDMX representó un consumo energético de 21.53 PJ, donde los vehículos A, B y C participaron con 47%, 10% y 43%, respectivamente; puede observarse el pico abrupto que ocasionó este alto valor de consumo, respecto al de los otros pares estudiados. Es de interés en este par cómo –a pesar de que en el aforo vehicular las unidades tipo C fueron 27% de los vehículos tipo A– en la evaluación del consumo energético se obtuvieron resultados muy similares en ambos tipos vehiculares.

En lo que respecta a la ruta CDMX-VER se observó, al igual que en la ruta anterior, cómo el par que confluye a la Ciudad de México tuvo una participación mayor en el consumo energético respecto a los otros dos pares de esta ruta. Desde CDMX hasta PUE, el autotransporte consumió 11.56 PJ de energía, valor inferior al que se obtuvo para el par QRO-CDMX, esto debido a dos circunstancias que diferencian a ambos arcos: la primera, la distancia entre los nodos es menor para el CDMX-PUE, la segunda, el número de vehículos tipo B y C.

De la energía consumida entre Ciudad de México y Puebla, 84% correspondió al tipo vehicular A, 7%, al B y 9%, al C. En el par PUE-COR se obtuvo 4.57 PJ, que se repartió en 60% para el tipo A, 18% para el B y 22% para el C; se observó que los autobuses y camiones de carga

Gráfica 1
Consumo de energía, viajes de corto itinerario



Fuente: elaboración propia.

que circulan en los pares CDMX-PUE y PUE-COR consumieron prácticamente una cantidad idéntica de energía. En el par COR-VER, el consumo energético fue de 0.91 PJ, con una participación de 51% para los vehículos tipo A, 22% para los tipo B y 27% para los tipo C; en este último par, los autobuses y camiones de carga consumieron una cantidad semejante de energía, mientras que los vehículos tipo A, una cantidad equivalente a la suma de los otros dos tipos.

En el escenario hipotético, para la ruta GDL-CDMX, el arco GDL-LPD presentó un consumo total de 0.47 PJ, distribuidos en 49% por los vehículos tipo A, 22% por el B y 26% por el C; mientras el tren de alta velocidad tuvo una participación de 3%. El viaje LPD-QRO consumió 3.12 PJ de energía; los vehículos automotores participaron con la mayor proporción: 52% los A, 14% los B y 31% los C; el TAV aportó 3% de este consumo energético.

En el arco GDL-LEÓN los transportes consumieron 3.01 PJ de energía, 53% de los vehículos A, 20% del tipo B, 24% del C y 3% del TAV. En el LEÓN-QRO se obtuvo un consumo energético de 2.80 PJ, el tipo A participó con 52%, el tipo B con 14%, el C con 31% y el TAV con el 3%; para la ruta proveniente de occidente, el escenario hipotético presentó un consumo energético menor en todos los arcos, respecto al escenario actual. Esto indica que la reducción de vehículos automotores al migrar sus usuarios al TAV abonó positivamente a economizar en la energía.

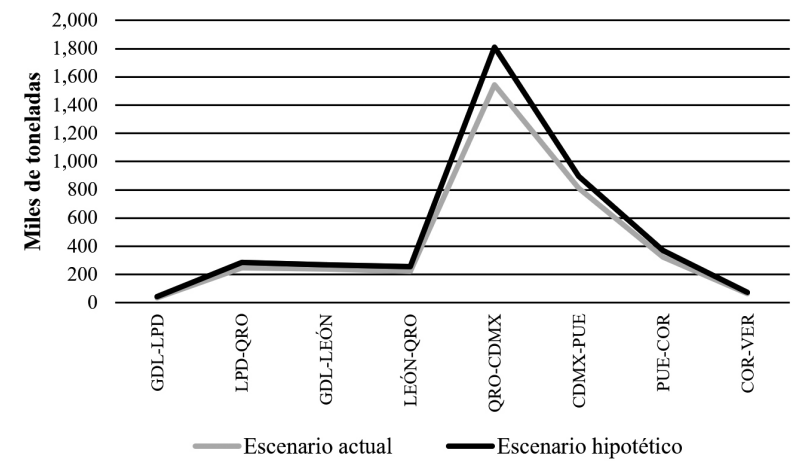
Para la ruta CDMX-VER se observó de nueva cuenta que el par con mayor consumo fue el CDMX-PUE, con 10.07 PJ de energía; de los cuales 80% fue aportado por el tipo A, 7% por el tipo B, 9% por el C y 3% por el TAV. En orden de magnitud descendente, le siguió el par PUE-COR, con 4.08 PJ consumidos, 56% por el tipo A, 18% por el B, y 22% por el C, mientras que el modo ferroviario aportó el 3%. El arco con menor consumo energético fue el COR-VER, su total de energía consumida fue de 0.82 PJ. De este consumo los vehículos tipo A aportaron 47%, los B, 22%, los C, 27% y el TAV 4%. De nueva cuenta se repitió lo observado en la ruta anterior: la migración de usuarios y carga al TAV lograron ahorros en términos de energía consumida.

Respecto a la emisión de GEI, en la gráfica 2 se representa la masa que fue irradiada a la atmósfera, tanto en el escenario actual como en el hipotético. En el caso del escenario actual, las emisiones de GEI se calcularon para el consumo energético debido a la gasolina y al diésel en cada tipo de vehículo; para utilizar el correspondiente factor de emisiones en el auto-transporte que se emplea en la ecuación 2 —una vez que se tuvo el efecto de las emisiones debidas a cada combustible en cada tipología vehicular, al tener una misma unidad de medida— se realizó la suma aritmética de éstas y se presentó este resultado para cada corredor estudiado; el cálculo realizado

incluyó la disgregación de la masa de GEI que cada par origen-destino aportó en cada una de las rutas.

Las emisiones GEI en la ruta GLD-CDMX, en la opción que pasa por La Piedad, constituyeron en total 1,830,000 toneladas. El desglose de esta cantidad en sus arcos intermedios mostró que, entre GDL-LPD se emitieron 37,600 t; para el par LPD-QRO, 248,400 t, y para el par QRO-CDMX, 1,544,000 t. En esta misma ruta, pero para la opción que pasa por León, las emisiones de GEI en el año estudiado fueron 2,006,000 toneladas, el par QRO-CDMX cubre la misma ruta que en la alternativa anterior, por lo tanto, su participación fue idéntica, mientras que los pares GDL-LEÓN y LEÓN-QRO presentaron una pequeña variación entre ellos: en el primero se emitieron 240,000 t y en el segundo 222,000 t. Para la ruta hacia el oriente, CDMX-VER, el total emitido fue de 1,200,000 toneladas, de esta cantidad, el arco CDMX-PUE emitió 810,000 t, el PUE-COR 325,000 t, y el COR-VER 65,000 toneladas.

Gráfica 2
Emisión de GEI, viajes de corto itinerario



Fuente: elaboración propia.

Resulta congruente que al comparar entre arcos de una misma ruta los pares con mayor aforo vehicular hayan sido los que mayor cantidad de energía consumida y mayores emisiones reportaron. No obstante, al comparar los arcos intermedios que mayor incidencia vehicular presentaron en rutas diferentes –QRO-CDMX con el CDMX-PUE– se manifestó que (si bien el primero reportó una menor cantidad de vehículos respecto al segundo) su cantidad de consumo energético y emisiones de GEI fueron mayores respecto a los del segundo, ello debido a que la

distancia recorrida entre QRO-CDMX es mayor a la correspondiente a CDMX-PUE.

Para el escenario hipotético se incluyó el transporte ferroviario de alta velocidad y se disgregó la energía que éste consumiría, de acuerdo al combustible con que se genera la electricidad en México (Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso, 2012); de esta forma, se utilizó el factor de emisiones correspondiente a cada fuente.

Una vez que se obtuvo la cantidad de emisiones debidas a cada combustible, al tener una misma unidad de medida, se realizó la suma aritmética de éstas y se presentó este resultado para cada corredor estudiado al diferenciar la cantidad por origen-destino en las rutas.

Las emisiones que el corredor de transporte hipotético GDL-CDMX, por La Piedad, arrojó a la atmósfera 2,136,000 toneladas. El arco que mayor cantidad aportó fue el QRO-CDMX, con 1,809,000 t, seguido por el LPD-QRO, donde se estimaron 285,000 t. El par que participó con la menor cantidad fue el GDL-LPD, con 43,000 t. Para esta misma ruta, pero en la alternativa que pasa por León, se estimaron 2,334,000 toneladas. El arco QRO-CDMX aportó la cantidad ya descrita, mientras en el arco GDL-LEÓN se emitieron 271,000 t y en el par LEÓN-QRO, 254,000 t. En el corredor CDMX-VER se calcularon 1,342,000 toneladas de GEI. De éstas, 895,000 t emanaron del arco CDMX-PUE; 371,000 t del PUE-COR y 76,000 t de COR-VER.

Se observó cómo el escenario hipotético emitió una mayor cantidad de GEI respecto al escenario actual. Esto se debió a que, si bien el TAV abonó positivamente a una reducción en el consumo energético, los combustibles generadores de la electricidad empleada tuvieron altos factores de emisión.

El cálculo del costo debido al consumo energético y a las emisiones de gases efecto invernadero se realizó con la multiplicación del total de megajulios en el primero, y la totalidad de toneladas en las segundas, por su precio correspondiente mencionado en el apartado metodológico.

El resultado de lo anterior se muestra en el cuadro 3, para cada par origen-destino considerado en ambos escenarios. En todos los arcos, para el escenario hipotético se presentó un incremento en el costo de las emisiones, sin embargo, dado que este rubro rondó tan sólo 1% del costo energético, en la suma total se presentaron ahorros del escenario hipotético respecto al actual, del orden de 10% para casi todos los pares, es la excepción el par COR-VER, donde esta relación fue de 9 por ciento.

Cuadro 3
Costos por consumos y emisiones, millones de pesos,
en viajes de corto itinerario

<i>Par</i>	<i>Consumo energético</i>		<i>Emisiones</i>		<i>Total</i>	
	<i>Escenario actual</i>	<i>Escenario hipotético</i>	<i>Escenario actual</i>	<i>Escenario hipotético</i>	<i>Escenario actual</i>	<i>Escenario hipotético</i>
GDL-LPD	\$174.90	\$157.37	\$1.44	\$1.65	\$176.34	\$159.02
LPD-QRO	\$1151.70	\$1034.69	\$9.51	\$10.91	\$1161.21	\$1045.60
GDL-LEÓN	\$1108.80	\$999.57	\$9.19	\$10.37	\$1117.99	\$1009.94
LEÓN-QRO	\$1032.90	\$932.09	\$8.50	\$9.72	\$1041.40	\$941.81
QRO-CDMX	\$7104.90	\$6470.72	\$59.10	\$69.25	\$7164.00	\$6539.97
CDMX-PUE	\$3814.80	\$3348.92	\$31.01	\$34.26	\$3845.81	\$3383.18
PUE-COR	\$1508.10	\$1358.75	\$12.44	\$14.20	\$1520.54	\$1372.95
COR-VER	\$300.30	\$273.33	\$2.49	\$2.91	\$302.79	\$276.24

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. *Viajes directos*

El análisis de los viajes directos en el escenario actualmente ofrecido a los usuarios se realizó de manera análoga al de los viajes de corto itinerario en los cuatro pasos mencionados, pero se incluyó al avión en la oferta del transporte de los corredores. Se utilizaron los datos públicos disponibles más recientes de las estaciones de aforo mostradas en SCT (2013) y se sumaron los porcentajes del total de vehículos que realizan el recorrido completo.

Se determinó que para GDL-CDMX, 5.85% de éstos recorren la totalidad del trayecto en ambos sentidos. Para CDMX-VER se procede de manera análoga, y se observó que 5.11% de los vehículos, en ambos sentidos, recorren la totalidad del itinerario. Para el transporte aéreo, la cantidad de vuelos que realizaron el viaje entre los nodos extremos de cada ruta estudiada se obtuvo al consultar el sitio electrónico de acceso público Expedia (2019) y la base de datos de SCT (2018b); la primera referencia mostró que, en el puente aéreo GDL-CDMX, hay cuatro compañías aéreas que ofrecen el servicio: Aeroméxico, Interjet, Viva Aerobus y Volaris, y para el puente aéreo CDMX-VER son tres las compañías: Aeromar, Aeroméxico y Viva Aerobus; SCT (2018b) mostró la cantidad de vuelos para el año de estudio entre cada par origen-destino, lo cual se cotejó con

la cantidad de vuelos diarios, por compañía, que se exponen en Expedia (2019), así se obtuvo el número de vuelos considerados.

Los pasajeros en el TAV se obtuvieron de manera análoga a los viajes de corto itinerario –pero incluyendo a los que migran desde el avión hacia el TAV– al utilizar los porcentajes de atracción e inducción que indicaron Herrera-García y Sánchez-López (2015), para el primero, así como Fernández Jáñez (2012) y García Álvarez (2016), para el segundo.

En el caso de la carga, para el transporte carretero su proporción fue la misma que la obtenida previamente en el escenario actual ofertado; en el caso aéreo se consideró el valor que SCT (2018b) reportó respecto al tonelaje total transportado en el año de estudio, y se disagregó en los porcentajes de participación por ruta. La carga en el TAV se obtuvo al aplicar el promedio de los porcentajes que se mencionan en la metodología.

El resultado de lo anterior se muestra en el cuadro 4, donde se cuantifica el total de vehículos que realizaron el viaje completo directo entre los nodos extremos de las rutas en el año estudiado.

Para el cálculo del consumo energético en los viajes directos se definieron las distancias por recorrer en cada ruta. En el autotransporte, para el itinerario GDL-CDMX, se tomó el promedio aritmético de la distancia total mostrada en los correspondientes diagramas unifilares (Guerrero Fernández y Kato-Vidal, 2022). Para el transporte aéreo, en el epígrafe 3.1. se mencionaron las distancias ortodrómicas que los aviones recorren en cada arco, este valor fue empleado para calcular el correspondiente consumo de energía.

Cuadro 4
Aforos vehiculares, viajes directos, 2013

<i>Par</i>	<i>Tipo de vehículo</i>	<i>Escenario actual</i>	<i>Escenario hipotético</i>
GDL-CDMX	A	343,852	285,397
	B	39,936	36,729
	C	293,086	263,777
	Avión	9099	7512
	TAV	—	3031
CDMX-VER	A	429,663	356,620
	B	48,521	44,625
	C	160,246	144,221
	Avión	2643	2183
	TAV	—	1546

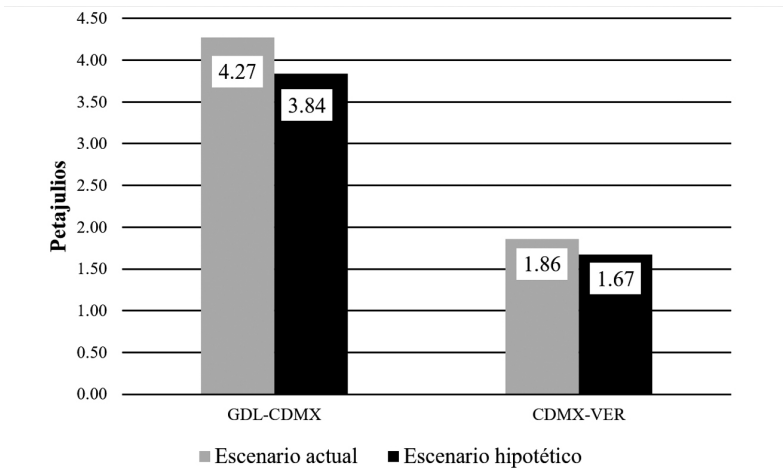
Fuente: elaboración propia.

A partir de lo anterior, se calculó el consumo energético y se diferenció entre los medios de transporte. En el caso del carretero, se utilizó la ecuación 1 de manera análoga a como se expuso para los viajes de corto itinerario. En el caso aéreo se definieron los tipos de aeronaves con los que cada empresa presta el servicio en los viajes considerados y se interpoló el consumo de combustible que cada tipo de avión requiere para las distancias ortodrómicas específicas de los viajes en estudio; para esto se empleó la información del cuadro 1.

Si bien cada aerolínea presenta los tipos de aviones que utilizan para prestar el servicio en los arcos estudiados (Aeromar, 2019; Aeroméxico, 2019; Interjet, 2019; Viva Aerobus, 2019; Volaris, 2019), no se muestra en específico qué tipo de aeronave emplean en cada viaje particular, por este motivo se promedió el consumo de combustible de los aviones con los que cuenta cada empresa para cubrir las rutas en estudio. Para el modo ferroviario de alta velocidad se calculó el consumo energético de los TAV separándolos entre los que transportan pasajeros y los que transportan carga. En la gráfica 3 se muestra la comparativa entre los dos escenarios.

En el escenario actual, para el par GDL-CDMX, se consumieron 4.27 PJ de energía, de los cuales la mayor parte fue consumida por los vehículos automotores tipo C, 2.08 PJ, seguido por el avión, con 1.22 PJ, en tercer lugar, los vehículos tipo A, 0.72 PJ y, finalmente, los B, que consumieron 0.26 PJ. En lo que respecta al viaje CDMX-VER, el consumo energético total resultó de 1.86 PJ, al igual que en la ruta anterior, los vehículos C participaron con la mayor cantidad de este consumo, 0.80 PJ,

Gráfica 3
Consumo de energía, viajes directos



Fuente: elaboración propia.

los A se situaron en segundo lugar, con 0.63 PJ, y los autobuses y el avión en un valor muy similar: 0.22 PJ y 0.21 PJ, respectivamente.

En el escenario hipotético, la ruta GDL-CDMX reportó un consumo energético total de 3.84 PJ. Al realizar el cálculo, se observó que los vehículos C son los que más consumen en este recorrido, con 1.87 PJ, seguidos por el avión con 1.01 PJ, los vehículos A, 0.59 PJ, los B, 0.24 PJ, y finalmente el TAV, con 0.13 PJ. En cuanto a la ruta CDMX-VER, resultó un consumo energético total de 1.67 PJ. De nueva cuenta los automotores tipo C presentaron el mayor consumo, con 0.72 PJ, en segundo lugar los A, con 0.52 PJ, y posteriormente los B, con 0.21 PJ, el avión con 0.17 PJ y el TAV con 0.05 PJ.

En ambos escenarios, el menor consumo energético del par CDMX-VER respecto al GDL-CDMX se explicó debido a las magnitudes de los recorridos; la distancia carretera y ortodrómica son menores en el primero respecto al segundo, al ser éste un parámetro que afecta directamente el resultado, como se constata en la ecuación 1, para el caso del autotransporte, y en el cuadro 1, para el transporte aéreo.

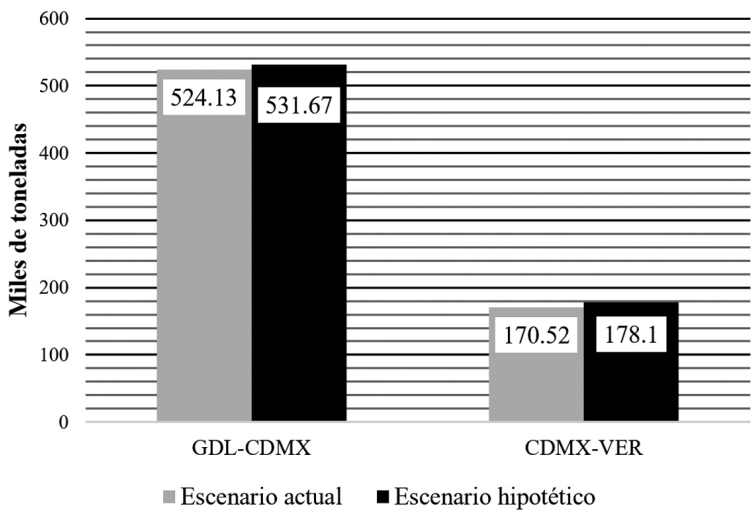
Las emisiones de GEI se calcularon para cada tipo de vehículo, de manera análoga a lo realizado para los viajes de corto itinerario, pero ahora se incluyó al avión. Para éste, se utilizó un promedio del factor de emisión entre los dos combustibles utilizados, el avgas y el avtur, debido a que las aerolíneas no reportan cuál utilizan para cada viaje en específico. Una vez que se obtuvo el tonelaje de GEI por vehículo, se realizó la suma correspondiente para obtener el valor por arco, tal como se muestra en la gráfica 4.

En el escenario actual, entre el par GDL-CDMX, se estimaron 524,000 t de GEI a la atmósfera: 302,000 t emitidas por los aviones, 153,500 t por los automotores de carga, 49,500 t los automóviles tipo A y 19,000 t por los autobuses. El par CDMX-VER, presentó 170,500 t de GEI, los vehículos que más gases emitieron fueron los aviones y los automotores de carga, 51,500 t y 59,000 t, respectivamente, a los que siguieron los vehículos tipo A y tipo B, con 43,500 t y 16,500 t, respectivamente.

En el escenario hipotético, en el viaje directo entre GDL-CDMX se emitieron 531,670 t de GEI a la atmósfera, la mayor participación fue del avión, con 249,260 t, seguido por los vehículos tipo C con 138,040 t, el TAV con 85,510 t, los automóviles con 41,220 t, y los autobuses con 17,640 t. En el arco CDMX-VER se obtuvieron 178,100 t, en orden de mayor a menor: 53,010 t las emitieron los vehículos C; 42,670 t, los aviones; 36,180 t, los vehículos A, casi igualado por el TAV, con 31,190 toneladas, y 15,050 t los vehículos tipo B.

Para ambas rutas en viajes directos, es de interés observar cómo, mientras el consumo energético del TAV fue el menor respecto a los otros cuatro medios de transporte, la cantidad de emisiones de GEI quedó en

Gráfica 4
Emisión de GEI, viajes directos



Fuente: elaboración propia.

la tercera y en la cuarta posición. La razón fueron los factores de emisión considerados para la energía eléctrica; las fuentes estacionarias de energía eléctrica a nivel nacional consumen principalmente hidrocarburos y carbón, combustibles con un alto factor de emisiones, tanto de CO_2 , como de CH_4 y N_2O . Esta situación ocasionó que las emisiones de GEI agregadas por cada arco fueran mayores en el escenario hipotético.

Para obtener los costos del consumo energético de emisiones de GEI en los viajes de itinerario completo se evaluaron de forma independiente los dos arcos en estudio, se distinguió entre los tipos de vehículos, debido a que el costo por megajulio de energía consumida en el autotransporte es distinto al del transporte aéreo y al del TAV. Sin embargo, como los resultados finales se obtuvieron en unidades monetarias, se realizó la suma aritmética para obtener un total por par origen-destino, tal como se muestra en el cuadro 5.

En ambos escenarios, el costo de las emisiones resultó dentro de 1% correspondiente al costo del consumo energético en ambos pares. Es notorio cómo, mientras los montos del consumo energético disminuyeron del escenario actual al escenario hipotético, se incrementaron los correspondientes a las emisiones de GEI, pero, al sumar ambos, se obtuvo un ahorro que ronda 9% en ambos pares.

Cuadro 5
Costos por consumos y emisiones, millones de pesos,
en viajes directos

<i>Par</i>	<i>Consumo energético</i>		<i>Emisiones</i>		<i>Total</i>	
	<i>Escenario actual</i>	<i>Escenario hipotético</i>	<i>Escenario actual</i>	<i>Escenario hipotético</i>	<i>Escenario actual</i>	<i>Escenario hipotético</i>
GDL-CDMX	\$1351.40	\$1227.10	\$20.06	\$20.35	\$1371.46	\$1247.45
CDMX-VER	\$603.30	\$546.60	\$6.53	\$6.81	\$609.83	\$553.41

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados del presente artículo muestran que al considerar los combustibles que se utilizan en México para la generación de energía eléctrica, la cantidad de GEI emitida a la atmósfera se incrementa tras la inclusión de una LAV en los corredores de transporte propuestos. Si bien el consumo energético reporta una disminución, los GEI adicionales al CO₂ que se producen en las plantas estacionarias generadoras de electricidad son los que mayormente aportan a dicho incremento. La presente investigación toma en cuenta, a diferencia de los análisis tradicionales, los combustibles a partir de los cuales se genera el fluido eléctrico. Si bien, de momento, en México se le asigna un bajo costo a la tonelada de GEI emitida, se recomienda que en los proyectos TAV se utilice energía eléctrica mayormente producida mediante fuentes limpias.

Para el consumo energético, en los viajes de corto itinerario, se observó que es entre 10 y 13% menor para los ocho corredores intermedios al incluir el tren de alta velocidad en los servicios de transporte. En los viajes directos esta reducción es de 10% en los dos corredores que contemplaron este tipo de viaje. En lo que respecta a la emisión de GEI, ésta aumenta por la inclusión del TAV en los corredores. Para el corto itinerario hay un incremento de entre 10 y 17% en este efecto. En los viajes directos, el aumento es de 1 y 4%, según la ruta considerada. Estos incrementos se explican debido a que las plantas mexicanas que producen la energía eléctrica para alimentar a los TAV utilizan mayoritariamente hidrocarburos y carbón como precursores de este fluido, ambos combustibles tienen un alto factor de emisiones tanto de CO₂ como de N₂O y CH₄.

Sin embargo, tras la valoración económica del consumo energético y las emisiones, el aumento de éstas no impactó en el monto total obtenido, debido al bajo costo unitario que en México se le asigna a la tonelada de GEI emitida. Al agregar los costos por consumo energético y por emisión

de GEI se obtuvo que, en los corredores de corto itinerario, hubo un ahorro de entre 9 y 12%, mientras que en los dos corredores con viajes directos este ahorro fue de 9 por ciento.

Como futuras líneas de investigación se propone valorar el impacto ambiental que el tonelaje adicional de GEI, emitido tras la inclusión del TAV, provoca en las zonas donde se localizan las plantas que la alimentarán de energía eléctrica y, si se desea, realizar una evaluación medioambiental completa, que incluya el ruido y el impacto sobre el territorio.

Fuentes consultadas

Aeromar (2019), “Sitio web de Aeromar”, <<https://acortar.link/0gw5r6>>, 5 de mayo de 2019.

Aeroméxico (2019), “Vuelos”, <<https://acortar.link/WZhGzj>>, 15 de mayo de 2019.

Alias, Jean (1984), *La voie ferrée: techniques de construction et d'entretien*, París, Eyrolles.

Barreno Ripoll, Manuel; Casado Fuente, Ma. Luisa; Castejón Solanas, Ma. Ángeles y Sebastián Lorente, Luis (2008), *Trigonometría esférica, fundamentos*, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

Benavides Ballesteros, Henry Oswaldo y León Aristizabal, Gloria Esperanza (2007), “Información técnica sobre gases de efecto invernadero y cambio climático”, Bogotá, IDEAM, <<https://acortar.link/tKlvC8>>, 17 de febrero de 2020.

Cadengo Ramírez, María; Casanova Zavala, Wendy Alejandra y Mendoza Díaz, Alberto (2018), “Desarrollo de metodología para la estimación de los vehículos-kilómetro recorridos anualmente, a nivel nacional”, Sanfandila, Instituto Mexicano del Transporte, <<https://acortar.link/l4leCx>>, 13 de enero de 2020.

Campos Robledo, Jacobo y Olivares, Wilmer (2013), “Relación entre las emisiones de CO₂, el consumo de energía y el PIB: el caso de los CIVETS”, *Semestre económico*, 16 (33), Medellín, Universidad de Medellín, pp. 45-66, doi: <https://doi.org/10.22395/seec.v16n33a2>

- Cartes Mena, Fernando (2018), “Metodología de inclusión de precio social de carbono en proyectos de inversión pública”, San José de Costa Rica, Cepal, <<https://acortar.link/GX6HZz>>, 9 de diciembre de 2019.
- Conuee (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) (2020), “Lista de combustibles”, Ciudad de México, Secretaría de Energía, <<https://acortar.link/gytGju>>, 7 de julio de 2020.
- EIA (U.S. Energy Information Administration) (2019), “Annual energy outlook 2019”, Washington D. C., EIA, <<https://bit.ly/3Wf8eEP>>, 27 de diciembre de 2019.
- El INPC (2020), “El precio de la gasolina 2013”, Ciudad de México, FinanciarRed, <<https://acortar.link/GsiZSt>>, 17 de septiembre de 2020.
- Essen, Huib van; Fiorello, Davide; El Beyrouti, Kareen; Bieler, Cuno; Wijngaarden, Lissane van; Schroten, Arno; Parolin, Riccardo; Brambilla, Marco; Sutter, Daniel; Maffii, Silvia; Fermi, Francesca (2020), *Handbook on the external costs of transport*, Bruselas, Comisión Europea.
- Expedia (2019), “Consulta de vuelos”, <<https://acortar.link/4WuC9M>>, 14 de mayo de 2019.
- Fernández Jáñez, Judith (2012), “Análisis de los datos de tráfico del primer año de explotación de la línea de alta velocidad de Madrid a Valencia”, *360. Revista de alta velocidad*, núm. 2, Madrid, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, pp. 57-71, <<https://bit.ly/3Fn3cQ6>>, 23 de mayo de 2020.
- FIT (Foro Internacional del Transporte) (2014), *Revisión del FIT-OCDE sobre el desarrollo del ferrocarril de transporte de carga en México*, Ciudad de México, Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.
- García Álvarez, Alberto (2016), *La demanda en el transporte de viajeros. Generación, evolución y reparto modal*, Madrid, Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- García Álvarez, Alberto (2008), “Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos”, *Vía libre*, núm.

- 515, pp. 26-34, Madrid, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, <<https://acortar.link/GE5HcL>>, 6 de diciembre de 2019.
- Guerrero Fernández, José Antonio, Kato-Vidal, Enrique (2022), “Esperando el tren: Productividad territorial y el proyecto de alta velocidad ferroviaria en México”, *Economía, Sociedad y Territorio*, 12 (68), Zinacantepec, El Colegio Mexiquense, pp. 147-176.
- Gutiérrez Puebla, Javier (2004), “El tren de alta velocidad y sus efectos espaciales”, *Investigaciones Regionales*, núm. 5, Madrid, Asociación Española de Ciencia Regional, pp. 199-221, <<https://bit.ly/3iZV8NL>>, 16 de marzo de 2020.
- Herrera-García, Alfonso y Sánchez-López, Orlando (2015), “Estimación del potencial de los trenes de media y alta velocidad en México con base en la demanda de pasajeros aéreos”, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16 (2), Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 265-277, <<https://bit.ly/3BsFW1G>>, 23 de julio de 2019.
- Holvad, Torben; Craps Amandine; Campos, Javier (2016), “Environmental performance and implications of high-speed rail”, en Daniel Albalade y Germá Bel (2016), *Evaluating high-speed rail*, Londres, Routledge, pp. 100-118.
- ICAO (International Civil Aviation Organization) (2018), “Carbon Emissions Calculator Methodology”, Montreal, ICAO, <<https://acortar.link/8v4YKt>>, 12 de enero de 2020.
- IEA (International Energy Agency) (2020), “Key world energy statistics 2020”, París, IEA, <<https://acortar.link/QLe1XR>>, 25 de marzo de 2022.
- Imco (Instituto Mexicano para la Competitividad) (2013), “Transición energética y competitividad”, Ciudad de México, Imco, <<https://acortar.link/PIXWdp>>, 6 de diciembre de 2019.
- Indexmundi (2020), “Gasolina de aviación, precio diario”, Massachusetts, Index mundi, <<https://acortar.link/ixqDC1>>, 21 de septiembre de 2020.

- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020), “Censos económicos 2004, 2009 y 2014”, Aguascalientes, Inegi, <<https://acortar.link/wMIkak>>, 15 de marzo de 2020.
- Interjet (2019), “Selección de vuelo”, <<https://acortar.link/qkDMsv>>, 14 de mayo de 2019.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Nueva York, Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Kanagawa, Institute for Global Environmental Strategies.
- Klein, Nicholas y Smart, Michael (2017), “Millennials and car ownership: less money, fewer cars”, *Transport Policy*, vol. 53, Ámsterdam, Elsevier, pp. 20-29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.08.010>
- Larsson, Jorgen; Kamb, Anneli; Näsén, Jonas y Åkerman, Jonas (2018), “Measuring greenhouse gas emissions from international air travel of a country’s residents methodological development and application for Sweden”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 72, Ámsterdam, Elsevier, pp. 137-144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.013>
- Liang, Xiao Hong; Tan, Ke Hu; Whiteing, Anthony; Nash, Chris y Johnson, Daniel (2016), “Parcels and mail by high speed rail—A comparative analysis of Germany, France and China”, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6 (2), Ámsterdam, Elsevier, pp. 77-88, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.04.003>
- López-Pita, Andrés (2014), *Líneas de ferrocarril de alta velocidad: planificación, construcción y explotación*, Madrid, Garceta.
- Martínez Acevedo, José Conrado e Iglesias Díaz, José Ignacio (2018), “El transporte ferroviario como la solución de transporte más sostenible: desarrollos actuales para la mejora de la eficiencia energética del ferrocarril”, *Ingeniería Civil*, núm. 191, Madrid, Ministerio

de Fomento, pp. 124-132, <<https://acortar.link/IDhSSr>>, 25 de febrero de 2019.

Mendoza Sánchez, Juan Fernando y Téllez Gutiérrez, Rodolfo (2006), “Trenes de alta velocidad en el mundo y su posible utilización en México”, ponencia presentada en la XVI Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres, 26-29 de julio de 2006, Boca del Río.

Modelistica (2014), “Estudio de demanda para el TAV México-Querétaro”, Reporte técnico, Ciudad de México, Modelistica.

Montoya Martín del Campo, Alberto; Núñez González, Gonzalo; Rodríguez Bolaños, Fabiola; Barrera Ríos, Samuel; Guerrero Hernández, María del Pilar; Estrella Santiago, Alinee Denisse; Añorve de San Pedro, Raúl; Acolt Temis, Carlos Antonio; Morales Ortiz, Janeth y Ordoñez Cázares, María Fernanda (2019), *Balance nacional de energía 2018*, Ciudad de México, Secretaría de Energía.

Nishijima, Shigehiro; Eckroad, Steven; Marian, Adela; Choi, Kyengondal; Seok-Kim, Woo; Terai, Motoaki; Deng, Zidang; Zheng, Jun; Wank, Jiasu; Umemoto, Katsuya; Du, Jia; Febvre, Pascal; Keenan, Shane; Mukhanov, Oleg; D-Cooley, Lance; P-Foley, Cathy; V-Hassenzahl, William y Mitsuro, Izumi (2013), “Superconductivity and the environment: a roadmap”, *Superconductor science and technology*, 26 (11), Londres, IOP Publishing, pp. 1-36, doi: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/11/113001>

Oiltanking (2020), “Glosario combustibles de aviación”, Hamburgo, Oiltanking GmbH, <<https://acortar.link/X2kNPf>>, 4 de septiembre de 2020.

Ramírez Carmona, Ulises; Merino Morales, María Fernanda; Tobón Velázquez, Nidia Ivonne (2022), *Pulso del Sistema Ferroviario Mexicano*, Ciudad de México, Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario.

Ramos-Gutiérrez, Leonardo de Jesús y Montenegro-Fragoso, Manuel (2012), “La generación de energía eléctrica en México”, *Tecnología y ciencias del agua*, 3 (4), Jiutepec, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 197-211, <<https://bit.ly/3uIreAb>>, 22 de mayo de 2020.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2019), “Traza tu ruta”, Ciudad de México, SCT, <<https://acortar.link/yAFyL>>, 5 de abril de 2019.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018a), “Datos viales, volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo de vehículos”, Ciudad de México, SCT, <<https://acortar.link/H4wg1B>>, 4 de mayo de 2019.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2018b), “Aviación Mexicana en Cifras 1991-2017”, Ciudad de México, Dirección General de Aeronáutica Civil, <<https://acortar.link/jo5tZS>>, 18 de agosto de 2019.

SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) (2013), “Estudio de origen, destino y peso”, Ciudad de México, SCT, <<https://bit.ly/3YcxNbL>>, 20 de abril de 2019.

Sheinbaum-Pardo, Claudia y Chávez-Baeza, Carlos (2011), “Fuel economy in new passenger cars in Mexico: trends from 1988 to 2008 and prospects”, *Energy Policy*, 39 (12), Ámsterdam, Elsevier, pp. 8153-8162, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.10.014>

Solís-Ávila, Juan Carlos y Sheinbaum-Pardo, Claudia (2016), “Consumo de energía y emisiones de CO₂ del autotransporte en México y escenarios de mitigación”, *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32 (1), Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 7-23, <<https://acortar.link/ozR3KM>>, 20 de junio de 2020.

Sotelo Navalpotro, José Antonio; Sotelo Pérez, María y Tolón Becerra, Alfredo (2011), “Las emisiones de gases efecto invernadero en el sector transporte por carretera”, *Investigaciones Geográficas*, núm. 54, Alicante, Universidad de Alicante, pp. 133-169, doi: <https://doi.org/10.14198/INGEO2011.54.05>

UIC (International Union of Railways) (2018), “High speed rail: A comprehensive system allowing door-to-door transportation”, París, UIC, <<https://acortar.link/RMvmTg>>, 7 de febrero de 2018.

Vía Libre (2009), “Renfe inicia la fabricación de trenes AVE de la serie 112 en sus propios talleres”, Madrid, Fundación de los Ferrocarriles

Espanoles, <<https://acortar.link/yf831p>>, 7 de noviembre de 2019.

Viva Aerobus (2019), “Flights”, <<https://acortar.link/zPgy9T>>, 17 de mayo de 2019.

Volaris (2019), “Vuelos”, <<https://acortar.link/eIQpwh>>, 21 de mayo de 2019.

Wolf, Peter y Simon, Werner (1984), “Energy consumption in air transport. A contribution to the problem of calculating and comparing energy consumption values of jet-propelled civil aircraft”, *Transport reviews*, 4 (2), Londres, Taylor & Francis, pp. 159-171, doi: <https://doi.org/10.1080/01441648408716554>

Xujie Feng, Quanxin Sun y Lu Liu, Minggao Li (2014), “Assessing energy consumption of high-speed trains bases on mechanical energy”, *Procedia-social and behavioral sciences*, vol. 138, Ámsterdam, Elsevier, pp. 783-790, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.260>

Recibido: 28 de noviembre de 2020.

Reenviado: 30 de marzo de 2022.

Aceptado: 3 de mayo de 2022.

José Antonio Guerrero Fernández. Ingeniero civil por la Universidad de Guanajuato, campus Guanajuato, maestro en Ingeniería en Vías Terrestres y Movilidad por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Ha sido consultor independiente en obras de infraestructura y del 2007 a la fecha Gerente del Departamento de Construcción y Proyectos en “Grupo LET, Excelencia Ferroviaria”. Su línea de investigación se centra en las externalidades de proyectos ferroviarios. Entre sus más recientes publicaciones se encuentran: *Ingeniería de las Vías Férreas*, Carolina del Norte, Lulu.com Press, (2017) y, como coautor: “Esperando el tren: productividad territorial y el proyecto de alta velocidad ferroviaria en México”, *Economía, Sociedad y Territorio*, 22 (68), Zinacantepec, El Colegio Mexiquense, pp. 147-176 (2021).

Saúl Antonio Obregón-Biosca. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Investigador en urbanística, maestro y doctor en ingeniería por el Departamento de Infraestructura del Transporte y Ordenación del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Profesor e investigador en la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UAQ. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II. Su línea de investigación actual se centra en el análisis de movilidad metropolitana y las externalidades del transporte. Entre sus últimas publicaciones se encuentran: “Traffic crashes probability: A socioeconomic and educational approach”, *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, vol. 58, Ámsterdam, Elsevier, pp. 619-628 (2018); “College student mobility in emerging countries: Case study on Universidad Autónoma de Querétaro, México”, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 6, Ámsterdam, Elsevier, 100155 (2020); “Indicador para evaluar el atributo de la comodidad en el transporte público, para la estimación de Modelos de Elección Discreta”, *Nova Scientia*, 12 (25), León, Universidad de La Salle Bajío, pp. 1-27 (2020).