



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Estado del arte acerca de la descarbonización de transporte en México

María Guadalupe López Domínguez
Daniel García De Santiago
José Javier Garrido Vega

Publicación Técnica No. 799
Querétaro, México
2024

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la División del Transporte Sostenible y Cambio Climático del Instituto Mexicano del Transporte, por la M. en C. María Guadalupe López Domínguez, el Ing. Daniel García De Santiago y el Ing. José Javier Garrido Vega.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna CI-03/23 Estado del arte acerca de la descarbonización del transporte en México.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores (as) y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	vii
Abstract.....	ix
Introducción.....	1
1. El compromiso ambiental de la descarbonización.....	5
1.1 Cambio climático.....	5
1.2 Gases de efecto invernadero.....	6
1.2.1 Dióxido de carbono.....	6
1.2.2 Metano.....	6
1.2.3 Óxido nitroso.....	7
1.2.4 Hidrofluorocarburos.....	7
1.2.5 Perfluorocarburos.....	7
1.2.6 Hexafluoruro de azufre.....	7
1.2.7 Trifluoruro de nitrógeno.....	7
1.2.8 Emisiones GEI.....	7
1.3 Causas del cambio climático.....	9
1.4 Efectos.....	11
1.5 Compromisos ambientales.....	13
1.6 Internacionales.....	14
1.6.1 Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático	14
1.6.2 Acuerdo de París.....	15
1.6.3 Contribuciones Determinadas a nivel Nacional.....	17
1.7 Nacionales.....	17

1.7.1	Ley General de Cambio Climático (LGCC).....	17
1.7.2	Ley de la Industria Eléctrica	18
1.7.3	Ley de Transición energética.....	18
1.7.4	Estrategia Nacional de Cambio Climático	18
2.	Descarbonización del transporte aéreo.....	21
2.1	Líneas de acción	22
2.1.1	Mejoras tecnológicas de las aeronaves.....	22
2.1.2	Mejoras en la operación	23
2.1.3	Uso de combustibles no fósiles	23
2.1.4	Compensación de emisiones	24
2.2	Situación nacional.....	26
3.	Descarbonización del transporte marítimo.....	29
3.1	Neutralidad de carbono 2050.....	29
3.1.1	Línea base	30
3.1.2	Medidas regulatorias.....	31
3.1.3	Procesos de adquisiciones con requerimientos medio ambientales.....	31
3.1.4	Mecanismos de precios	32
3.1.5	Incentivos no económicos.....	33
3.1.6	Inversiones del sector público	33
3.2	Situación en México.....	35
4.	Descarbonización del transporte terrestre.....	37
4.1	Transporte carretero.....	38
4.1.1	Evitar y reducir la necesidad de viajes motorizados.....	42
4.1.2	Cambiar a modos de transporte más sustentables.....	42
4.1.3	Mejorar los combustibles y la tecnología de los vehículos.....	43
4.1.4	Planes nacionales y estrategias	43
4.1.5	Normativa	44
4.1.6	Combustibles alternativos.....	44
4.1.7	Movilidad eléctrica	46

4.1.8	Movilidad con Hidrógeno.....	47
4.1.9	Infraestructura	48
4.2	Transporte de pasajeros.....	48
4.3	Transporte de carga.....	49
4.4	El reto nacional.....	50
	Conclusiones y recomendaciones.....	53
	Bibliografía	57

Sinopsis

El presente estudio es la recopilación de trabajos sobre la descarbonización de los modos de transporte aéreo, marítimo y terrestre desde un enfoque internacional hasta las implementaciones nacionales y en su caso locales de las rutas de descarbonización del transporte. Se identifican las metodologías para la mayor contribución para la reducción de GEI para el cumplimiento de metas al 2050. Con base a este análisis, realizar las propuestas para focalizar las políticas públicas que promuevan la descarbonización en el país.

Abstract

This paper is the compilation of the review on the decarbonization of air, maritime, and land transport modes from an international approach to national and, where appropriate, local implementations of transport decarbonization routes. Methodologies are identified that provide the greatest contribution to GHG reduction to meet the 2050 objectives. Based on this analysis, make proposals to focus public policies that promote decarbonization in the country.

Introducción

Para que México se logre sumar a los esfuerzos multilaterales enfocados al objetivo mundial de reducir los gases de efecto invernadero (GEI) para retardar el calentamiento global a un máximo de 2 °C (e idealmente no mayor a 1.5 °C), es necesario empatar las acciones de mitigación y reducción con las políticas públicas, nacionales y locales, para que significativamente impacten en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El compromiso de lograr este objetivo ha sido establecido en el Acuerdo de París en el Artículo 2 y en concordancia con la Ley General de Cambio Climático (LGCC) en el país.

La meta es lograr que las emisiones globales se reduzcan a la mitad para 2030 y a cero (neto) para el 2050 (ONU, Acuerdo de París, 2015). Además, México también presentó sus objetivos de mitigación y adaptación en sus Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) para el período 2022-2030 que comprende un objetivo incondicional de mitigación de reducir el 22 % de las emisiones de dióxido de carbono para 2030 en un escenario tendencial. México contribuye con 1.3 % de las emisiones globales, y el componente de mitigación del NDC incluye 30 acciones en 8 sectores: generación de electricidad; residencial y comercial; transporte; petróleo y gas; residuos; agricultura y ganadería, y uso de la tierra y cambio de uso de la tierra y silvicultura (UNFCCC, 2018).

Estos esfuerzos ya tienen décadas planteados y dándose seguimiento a través de las Conferencias de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP), sin embargo, no se han logrado los resultados para lograr descarbonizar al planeta. Los sectores donde los desafíos en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son mayores ya están identificados, en estos, es donde las estrategias de reducción pueden tener el mayor impacto; estos sectores son el de generación de energía eléctrica y el transporte (en todos sus modos) debido al uso de combustibles fósiles (petróleo y gas) (INECC, 2015). De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), es el sector transporte quien contribuye con el 25.1 % de las emisiones nacionales según lo reportado en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Los efectos del cambio climático ya se están percibiendo en nuestro país, y como ha documentado el Panel Intergubernamental sobre el Cambio

Climático (IPCC por sus siglas en inglés), en todas las regiones del mundo. México se compromete de forma no condicionada a realizar acciones integrales para reducir la vulnerabilidad de nuestro pueblo al cambio climático e iniciar un proceso de adaptación.

Uno de los trabajos más recientemente realizados en el tema de rutas de descarbonización, es el documento sobre Lineamientos para el Mapa de Ruta Tecnológica del Transporte Terrestre en México, para la visión 2021 – 2050, en el cual el Instituto Mexicano del Transporte participó en los temas de electromovilidad del transporte terrestre. En este documento, se ha concluido que, en complemento a la creación de metas y objetivos, estos no deben limitarse solo a los vehículos, sino que también incluyan la infraestructura, operación e inclusión de nuevos sectores para que los cambios sumen y sean significativos. También destaca que se debe conocer si es técnica y económicamente viable implementar estas acciones y, lo más importante, si realmente logran reducir significativamente las emisiones por lo que el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta primordial que incluir (SICT, 2023).

A lo anterior, se identificó es necesario establecer una línea base, con un diagnóstico actual sobre las rutas de descarbonización que se han planteado y algunas ya en trabajo, para identificar los esfuerzos multisectoriales que se están realizando y complementarlos con los análisis adecuados para dar guía a las políticas públicas que se necesitan plantear para que en el 2030 se cuente con metodologías más claras y, así, lograr los compromisos proyectados para el 2050. Esta línea estableció con la recopilación de la información documental en la competencia del Instituto, sobre el estado del arte en los modos de sector transporte terrestre (incluyendo el ferroviario), marítimo y aeroportuario, para plasmar un punto inicial y tener un diagnóstico de la descarbonización en México, esto, trabajándolo bajo la línea de investigación de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático de la División de Transporte Sostenible y Cambio Climático del Instituto Mexicano del Transporte.

La realización de este proyecto de iniciativa interna se alineó con el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 (PND) Objetivo 3.6 “Desarrollar una infraestructura del transporte accesible con enfoque multimodal (ferroviario, aeroportuario, transporte marítimo, transporte masivo), sostenible, a costos competitivos y accesibles que amplíe la cobertura de transportes nacional y regional”, y con la Estrategia 3.6.3 “Desarrollar una red de comunicaciones y transportes accesible, segura, eficiente, sostenible y moderna, con visión de desarrollo regional y de redes logísticas que conecte a todas las personas, facilite el traslado de bienes y servicios, y que contribuya a salvaguardar la seguridad nacional”. Los

objetivos fueron logrados fueron los de identificar y describir la situación actual del sector en el transporte terrestre, marítimo y aeroportuario en el marco de las acciones que pueden contribuir a las rutas de descarbonización en el país.

Primeramente, se logró establecer un escenario actual como línea base de cómo se encuentra la descarbonización sectorial con respecto a las políticas públicas del país, lo que permitió revisar los mayores desafíos en tecnología, adaptación y capacidad para implementar acciones, ya urgentes, para una descarbonización. Y finalmente, poder proyectar una visión prospectiva de las implementaciones de acuerdo con las rutas metodológicas planteadas para la reducción de GEI y emitir recomendaciones sobre los aspectos a trabajar para llevar a cabo la descarbonización del transporte.

1. El compromiso ambiental de la descarbonización

Debido a los cambios climáticos y a la pérdida de biodiversidad actual, estamos presenciando numerosos fenómenos meteorológicos extremos que están provocando daños de cada vez mayor magnitud. De acuerdo con la Agencia Oceanográfica y Atmosférica Nacional estadounidense (NOAA, por sus siglas en inglés), se están registrando las temperaturas más altas desde el 2005. El escenario que se proyecta es el de un mundo con incrementos de 3°C estimado para el año 2100, por lo que es desafiante, pero necesario, cumplir con las reducciones de emisiones que atenuar los efectos del cambio climático para mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de ellos 2° C. En el presente capítulo trata de los principales efectos y las razones de los compromisos para garantizar el bienestar colectivo. En este capítulo trataremos algunos conceptos básicos que los combustibles fósiles, el contexto climático y que es la descarbonización.

1.1 Cambio climático

Recordemos que nuestro planeta tiene una atmosfera natural la cual está compuesta de gases que retienen el calor del sol e impiden que se emita de vuelta por las noches al espacio, provocando así su calentamiento en todo el planeta. Este efecto, llamado efecto invernadero, permite que la temperatura del planeta se mantenga en rangos que permitan la vida en la Tierra, los gases de efecto invernadero (GEI) son lo que permiten este fenómeno. Cuando se emplean los combustibles de origen fósil, como lo son el carbón, el petróleo y el gas natural, a parte de la liberación de energía y calor que aprovechamos, el carbón e hidrógeno reaccionan con el oxígeno produciendo dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), entre otros gases, los cuales se liberan a la atmósfera. De este consumo de combustibles, es que el aporte de CO_2 sea del 75 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y casi el 90 % de todas las emisiones de dióxido de carbono (ONU, acción por el clima).

El efecto invernadero es un fenómeno natural y beneficioso para la vida de la Tierra. Sin embargo, el calentamiento global se produce como consecuencia de la combustión de gases fósiles expulsados por la industria, ganadería, vehículos y demás elementos terrestres, que generan

un incremento en la temperatura global. Los GEI están de manera natural en la atmósfera, sin embargo, la actividad humana ha modificado significativamente su concentración en la atmósfera de forma que su acumulación y aumento hacen que aumente el calentamiento de la Tierra, afectando ciclos biológicos y fenómenos ambientales que habían estado ocurriendo con regularidad, ahora ya no lo hacen. Como consecuencia presenciamos cambio en los patrones de nieve y de precipitaciones, las temperaturas anuales medias incrementan y se producen fenómenos climáticos más extremos, como olas de calor y precipitaciones más intensas y frecuentes.

1.2 Gases de efecto invernadero

Como ya mencionamos, los gases de efecto invernadero son varios, los principales son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) y más adelante hablamos de algunos más, la contribución que cada uno tiene al calentamiento global es diferente. Los gases fluorados de efecto invernadero son el tipo más potente y de mayor persistencia en el ambiente emitido por actividades del ser humano, y se llaman así porque tiene al elemento Flúor (F) que es un elemento extremadamente reactivo. Pueden producir un efecto invernadero miles de veces mayor que el CO_2 . Se incluyen en este tipo los hidrofluorocarburos (HFC), (perfluorocarburos), hexafluoruro de azufre (SF_6) y el trifluoruro de nitrógeno (NF_3). El Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París establece como gases de efecto invernadero objetivo para coordinar la respuesta global al cambio climático, a los siguiente siete gases:

1.2.1 Dióxido de carbono

El CO_2 es producido de forma natural por los animales durante la respiración y a través de la descomposición de la biomasa. Además, puede entrar en la atmósfera a través de la quema de combustibles fósiles y reacciones químicas. Durante la fotosíntesis, el proceso que convierte la luz solar en energía, las plantas lo eliminan de la atmósfera. Por tanto, los bosques desempeñan un papel importante en la captura de carbono.

1.2.2 Metano

El metano es un gas incoloro que constituye el principal componente del gas natural. Sus emisiones proceden de la producción y el transporte de carbón, gas natural y petróleo, así como de la ganadería y otras prácticas agrícolas, el uso del suelo y la descomposición de residuos orgánicos en vertederos municipales. En 2021, la mayoría de las emisiones de metano procedieron de la agricultura, la silvicultura y la pesca.

1.2.3 Óxido nitroso

Este gas se produce como resultado de la acción microbiana en el suelo, el uso de fertilizantes que contienen nitrógeno, la quema de madera y en la producción química. Se emite en actividades agrícolas e industriales, así como en el uso del suelo; la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos; y el tratamiento de aguas residuales. En la UE, la agricultura, la silvicultura y la pesca produjeron más emisiones de metano en 2021.

1.2.4 Hidrofluorocarburos

Los hidrofluorocarbonos representan alrededor del 90% de las emisiones de gases fluorados y la UE trabaja para eliminarlos progresivamente antes de 2050. Se utilizan sobre todo para absorber calor en frigoríficos, congeladores, aparatos de aire acondicionado y bombas de calor, así como en sprays para el asma y aerosoles técnicos, agentes espumantes y en extintores. En 2021, predominaron en los sectores de comercio al por mayor y al por menor, reparación de vehículos de motor y motocicletas.

1.2.5 Perfluorocarburos

Los perfluorocarburos son compuestos artificiales utilizados habitualmente en los procesos de fabricación industrial.

1.2.6 Hexafluoruro de azufre

El hexafluoruro de azufre se suele utilizar en el aislamiento de líneas eléctricas.

1.2.7 Trifluoruro de nitrógeno

El trifluoruro de nitrógeno es un gas que se emplea para la limpieza de cámaras en los procesos de producción para limpiar las acumulaciones no deseadas en las piezas de microprocesadores y circuitos a medida que se construyen.

Estos 7 gases de efecto invernadero (GEI) tienen un potencial de calentamiento global diferente y para poder comparar su impacto se convierte a CO₂ equivalente.

1.2.8 Emisiones GEI

En la Unión Europea (UE) en el 2021, las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por las actividades económicas alcanzaron los 3,600 millones de toneladas equivalentes de CO₂, un 22% menos que en 2008. El CO₂ representó casi el 80% del volumen de todas las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE, seguido del metano con más del

12%. El metano dura menos que el CO₂ en la atmósfera, pero absorbe mucha más energía solar. Se trata de un contaminante atmosférico peligroso y sus fugas pueden provocar explosiones (UE, 2021). En conjunto, todos los gases fluorados sólo representan alrededor del 2.5% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE. Sin embargo, aunque se emitan en cantidades menores, atrapan el calor de forma mucho más eficaz que el CO₂.

En 2021, las emisiones brutas de GEI de México ascendieron a 714 millones de toneladas de CO₂ equivalente, contribuyendo con 1.4% del total mundial, ubicando al país en segundo lugar en América Latina, solamente superado por Brasil. Las principales emisiones de México en 2021 fueron de dióxido de carbono (63.9%), metano (27.7%) y óxido nitroso (5.1%) destacando el sector energético y el agropecuario.

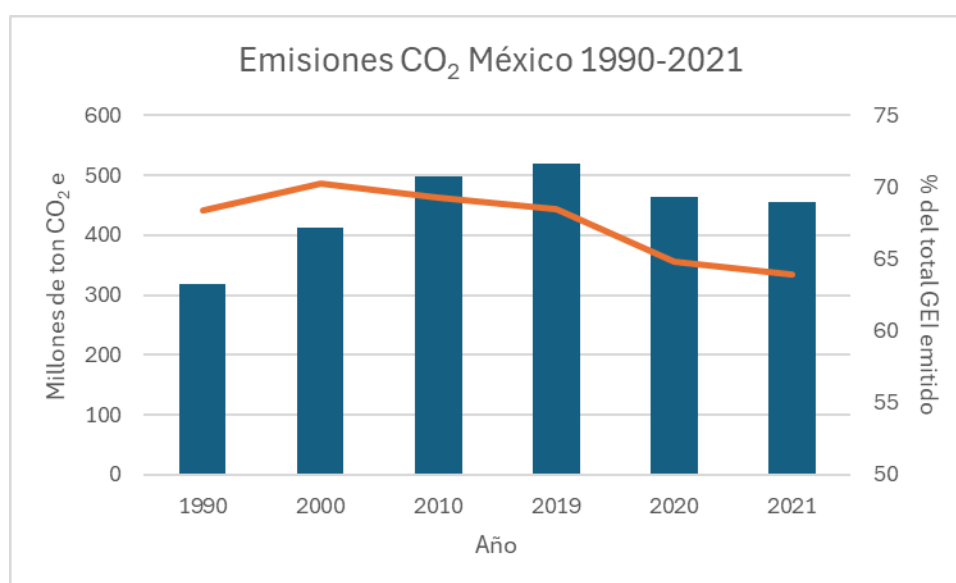


Figura 1.1 Emisiones de toneladas de CO₂ y porcentaje del total emitido

Fuente: modificado de Lara y Li, 2024.

Para comprender el comportamiento que han tenido las emisiones en nuestro país, podemos referirnos a la Figura 1.1, en donde podemos ver que las emisiones reportadas en 1990 fueron de 319.3 millones de toneladas métricas, incrementándose a 413.3 millones para el 2000 y, en la década siguiente, a 497.7 millones de toneladas métricas en 2010. Para 2019, antes de la pandemia por COVID-19, alcanzaron 520.3 millones de toneladas métricas y para el año 2021 llegaron a las 456.3 millones de toneladas. Así, México emitió 42.9% más dióxido de carbono en 2021 que en 1990. El INECC estima que el dióxido de carbono representó 63.9% del total de las emisiones de GEI en México durante 2021 (Lara y Li, 2024).

Es importante comentar que durante la pandemia por COVID-19, la economía mundial se contrajo 2.8% lo que se reflejó en una reducción del 3.7% de las emisiones de GEI brutas globales mundiales, en el caso de México, el PIB bajo 8.6% pero las emisiones solo lo hicieron en un 5.6%, esto puede ligarse a que dióxido de carbono en nuestro país es originado principalmente por la quema de combustibles para generar energía, representando el 63.9% de las emisiones de GEI (INECC, 2023).

1.3 Causas del cambio climático

El comienzo del fenómeno de calentamiento global se marca con el inicio de la Revolución Industrial, y con los primeros indicios de la remanencia del dióxido de carbono en la atmósfera. En los años de 1980 a 1990, se empezó a tener evidencia del incremento en la curva de temperatura media anual a lo que varias organizaciones no gubernamentales empezaron a abordar la necesidad de la protección al ambiente a fin de atender el cambio climático y sus afectaciones. Cerca de la década de los 90's es que se reconoce que el clima comienza a tener promedios anuales de temperatura mayores y se acepta la teoría del efecto invernadero y se crea el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Para entender el papel que han tenido los diferentes sectores en la aportación de GEI, repasemos algunas de las causas principales del cambio climático. Una gran cantidad de la energía eléctrica que se produce se genera a través de la quema de combustibles fósiles (carbón o gas), esta quema produce grandes cantidades de óxido de carbono y óxido nitroso, que como ya hemos visto, son gases con alto potencial de efecto invernadero, incrementando la captación de calor proveniente del sol e incrementando la temperatura global. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), en el 2019 se emitieron 14 giga toneladas de CO₂ atribuido al sector de generación de energía y calor (SENER, 2023), también se reportó hubo países que aumentaron hasta en un 85% sus emisiones globales por este concepto, como lo fueron China, la India y los Estados Unidos, aunque por otro lado hubo quienes si reportaron reducciones como Alemania, Japón, Francia, Reino Unido y México.

En ese sentido, en el país el tema de generación de energía es un tema estratégico respecto a la soberanía y autosuficiencia nacional por estar directamente involucrado al desarrollo económico del país y en otros sectores productivos y actividades, así como procura el bienestar de la población. Las emisiones de GEI por la generación eléctrica es del 23% de las generadas nacionalmente, en este porcentaje se contabilizan algunos

otros subsectores como lo son la manufactura de combustibles sólidos, la refinación del petróleo y producción de electricidad y calor.

Otro de los sectores que han contribuido al actual escenario de GEI son la industria y manufactura de productos; éstos queman combustibles fósiles para la obtención de cemento, metales, componentes eléctricos y electrónicos, ropa y muchos otros bienes. Aquí podemos enunciar la industria de la construcción, la minería y toda aquella que involucre procesos industriales en los cuales la maquinaria utilizada en sus procesos requiera de carbón, petróleo o gas.

La explotación de recursos naturales también ha tenido su contribución en las emisiones de GEI; puesto que los bosques absorben dióxido de carbono, cuando se talan, ya sea para el aprovechamiento de su madera, o para habilitar espacios para establecimiento de granjas, agricultura o pastoreo, las emisiones que han estado captadas por los árboles se libera. Cerca de 12 millones de hectáreas de bosque son destruidas anualmente lo que limita la capacidad aún más del planeta a reducir las emisiones con áreas de árboles. De los cambios de uso de suelo que se dan por la deforestación, para implementar actividades como la agricultura o ganadería, se les atribuye cerca de la cuarta parte de las emisiones GEI anuales. (UN)

Sobre la producción de alimentos y su contribución de emisiones GEI, esta se involucra en parte en las razones por las que se da el cambio de unos de suelo, propiciando la deforestación para la agricultura y el pastoreo, así como para la alimentación del ganado bovino y ovino. La producción y uso de fertilizantes y el abono utilizado para mejorar la producción de los cultivos, además del uso de la energía que hace funcionar el equipo de las granjas o los barcos pesqueros, siendo los combustibles fósiles el principal combustible empleado. Además, las emisiones de efecto invernadero también provienen del envasado y la distribución de los alimentos aunado que la población mundial ha ido en incremento y la demanda de alimentos también se ha incrementado con ello.

Otras dos causas importantes es el modo de vida que hemos estado adoptando. Tanto los edificios residenciales como los comerciales es que se consume más de la mitad de la electricidad total que se produce, hay que recordar que la energía no se almacena, sino se están produciendo al momento que la consumimos, el cual se ha ido incrementado para satisfacer el modo de vida en las viviendas. La creciente demanda de sistemas de calefacción y climatización, así como el aumento en la adquisición de aparatos de aire acondicionado y en consumo eléctrico por parte de aparatos de iluminación y dispositivos conectados, ha contribuido a un aumento en las emisiones de dióxido de carbono por

edificaciones, en los últimos años, ya que mayormente se emplea carbón, hidrocarburos y gas natural para estos sistemas de climatización y calefacción. Junto a la vivienda, está el consumo excesivo de la energía y de bienes como ropa, los componentes electrónicos y los productos fabricados en plástico. Un gran porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero están ligadas a los hogares particulares. Nuestro estilo de vida tiene un profundo impacto en el planeta, la tendencia de consumir más a mayor poder adquisitivo hace que muchas veces se adquiera más de los que se consume, haciendo incrementar la demanda de productos que requiere energéticos y no se consumirán. En ese sentido, el 1 % de la población mundial con mayor riqueza, en conjunto, genera más emisiones de GEI que el 50 % que menor ingreso económico.

Y finalmente, la causa, que junto con el sector energía, es uno de los principales sectores generadores de GEI es el transporte, debido a que la mayoría de los vehículos terrestres, barcos y aeronaves funcionan a través de combustibles fósiles, principalmente de emisiones de dióxido de carbono. El transporte es responsable de cerca de un cuarto de las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía a nivel global. Y la tendencia es que continúe este importante aumento del uso de la energía para el transporte durante los próximos años.

Las emisiones del transporte dependen de la demanda de traslado en función de varios factores como lo son del desarrollo urbano, la actividad económica, la cadena de suministro, la capacidad de compra y el comportamiento de los usuarios. La satisfacción de esta demanda requiere infraestructura vehicular como carreteras, vías, puertos, aeropuertos, banquetas, también requiere de vehículos y energía para operarlos, infraestructura energética para generar, distribuir y surtir esa energía, que generalmente como combustibles fósiles, como ya lo habías mencionado.

1.4 Efectos

Los fenómenos meteorológicos extremos derivados del incremento de la temperatura media del planeta, están dejando sentir sus efectos los cuales ponen en riesgo la salud humana, así como la seguridad alimentaria e hídrica. Aunque el efecto invernadero es un proceso natural de la Tierra necesario para retener el calor del sol y mantener la temperatura media del planeta, el desequilibrio en la proporción de gases de GEI y otros compuestos, provocan el calentamiento global.

La elevación de las temperaturas registradas en la última década (2011 al 2020) son las mayormente registradas en la historia, y desde los años 80, cada década ha tenido un registro de temperaturas mayores de que la

década anterior, por lo que podemos pronosticar esta década también tendrá la misma tendencia. Este incremento de temperatura provoca impactos en la salud pública porque aumenta las enfermedades relacionadas al calor y en la realización de actividades económicas en exteriores. La frecuencia e intensidad de los incendios también ha aumentado derivado del incremento de temperatura global, y en lugares como el Ártico, la temperatura se ha elevado el doble más rápido que el promedio mundial.

A medida que la temperatura se eleva, la evaporación de los cuerpos hídricos del planeta también lo hace, evaporando mayor humedad, lo que causa mayor precipitación, inundaciones y tormentas más destructivas. El calentamiento de los océanos también impacta en la frecuencia y magnitud de las tormentas tropicales, ciclones, huracanes y tifones, ya que se forman con las aguas templadas de los océanos. El impacto de estos fenómenos naturales tiene como mayor consecuencia la pérdida de comunidades costeras, impacta la actividad económica y cobra gran número de vidas humanas.

La disponibilidad del agua se está viendo comprometida por el aumento de la temperatura; se está aumentando los escases de agua en regiones de mayor sequía, así como los riesgos de pérdida de cosechas y cultivos por sequías ecológicas que aumentan la vulnerabilidad de los sistemas. Un efecto relacionado a la sequía de las zonas son los incrementos de tormentas de arena y polvo que pueden llegar a desplazar grandes cantidades de arena, incluso de un continente a otro, expandiendo los desiertos y reduciendo las zonas aptas para el crecimiento de cultivos. Las condiciones meteorológicas extremas, tienen ya repercusiones en la producción de alimentos, reportándose ya situaciones de desnutrición en la población porque el calor extremo disminuye la producción agrícola y afecta al ganado.

El océano absorbe una gran cantidad del calor que irradia hacia la Tierra, y con el calentamiento global, la temperatura de los océanos se ha incrementado considerablemente en las últimas dos décadas, a todas profundidades. No solo el deshielo de las placas de los polos e icebergs aumenta el volumen de agua en los océanos, sino también el efecto que tiene el agua con el aumento de temperatura, que es el de expandir su volumen. Este aumento de nivel de agua en los océanos pone en riesgo a las comunidades litorales e insulares, así como a las actividades económicas que se desarrollan. Otra función importante que llevan a cabo los océanos es la de absorber dióxido de carbono retirándolo de la atmósfera, sin embargo, este efecto, aunque beneficio para la atmósfera, es perjudicial para los mares ya que acidifica el agua, poniendo en riesgo

a las especies marinas y arrecifes de coral que son susceptibles a estos cambios de acidez en sus hábitats. Por otro lado, actividades como la pesca, también se ven impactadas al volverse menos productivas para la obtención de alimentos por los cambios de la población de peces.

Esto último es otro efecto que está teniendo el cambio climático que es la desaparición de especies; no solo los cambios en los mares que modifican los hábitats marinos, sino también a consecuencia de la pérdida de estos, como es el caso de los incendios. La supervivencia de las especies también es más difícil a causa de las temperaturas extremas y de las sequías, por lo que también se ha tenido el mayor registro de pérdidas de especies a una tasa 1000 veces mayor que en algún otro momento conocido de la historia humana.

Respecto a la salud humana, ya se han identificados problemas causados por las emisiones tóxicas y la contaminación atmosférica debido a la quema de combustibles fósiles, a los que se les está sumando los desplazamientos forzados, ya sea por búsqueda de producir o encontrar alimentos suficientes, así como agua, o por eventos meteorológicos extremos. Los patrones del cambio climático están propiciando la expansión de enfermedades, incrementan el número de personas que pierden la vida y someten cada vez más presión a los sistemas sanitarios y de recuperación en la incidencia de eventos meteorológicos extremos.

Una de las principales interacciones entre acción climática y salud es el reto de lograr un transporte que adopte medidas compensatorias específicas, que cuente con inversión en infraestructuras de transporte público, para poder permear un incremento en los costos que hagan más viable la transición a los aumentos de precio de combustibles fósiles para hacer competitivos los alternativos.

1.5 Compromisos ambientales

México ha tenido un papel importante en material de cambio climático y ha fijado un objetivo ambicioso de emisiones de GEI al 2050, el de reducir 300 millones de toneladas de CO₂. Este objetivo debe de ser consistente con una descarbonización profunda y acelerada de los sistemas energéticos del país. Responder a estos retos plantea problemas sin precedentes que deben ser resueltos en el desarrollo y difusión tecnológica, construcción de infraestructura, evolución de los mecanismos de regulación y de financiamiento, políticas públicas, trabajo colaborativo institucional, cambios en el comportamiento de los consumidores, entre muchos otros aspectos (Figura 1.2).

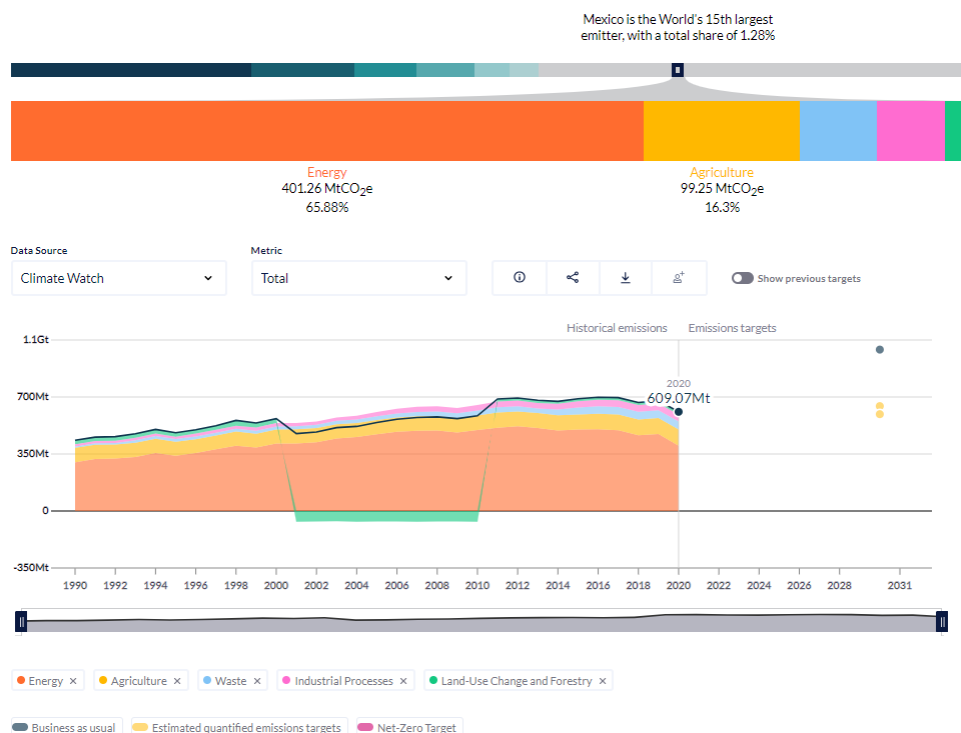


Figura 1.2 Emisiones históricas de México en MtCO₂e

Fuente: Climate Watch, 2023.

El logro de este objetivo implica que las emisiones netas globales de GEI deben ser aproximarse a cero en la segunda mitad del siglo. Esto exigirá una profunda transformación de los sistemas de energía hacia mediados de siglo, con reducciones notables en la intensidad de carbono en todos los sectores de la economía. Esta transición se denomina descarbonización profunda y es la única manera de lograr las reducciones requeridas en las emisiones. La descarbonización de la economía definirá la trayectoria del país a corto y mediano plazo, acelerando la transición energética con inclusión social, la co-creación de capacidades, y la resiliencia de las comunidades más vulnerables al cambio climático.

1.6 Internacionales

1.6.1 Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático

Dada la preocupación mundial sobre las emisiones de GEI y con el fin de reducir los efectos del cambio climático, en 1992 se firma la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), la cual entra en vigor en 1994. Los países miembros de la CMNUCC se conocen

como las “Partes”, mientras que las reuniones anuales, que son el principal mecanismo de decisión al interior de la CMNUCC se conocen como Conferencias de las Partes, o COP por sus siglas en inglés. En la COP3, celebrada en Japón en 1997, se firma el Protocolo de Kioto, acuerdo internacional clave sobre emisiones de GEI, el cual entra en vigor en el año 2005.

La COP es el órgano supremo de negociación y toma de decisiones vinculantes, que son adoptadas por consenso, de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en la que todos los Estados que son Parte de la Convención examinan su aplicación, así como la de cualquier otro instrumento jurídico que se busque adoptar, con la finalidad de fortalecer la acción climática internacional.

Los compromisos internacionales de nuestro país en materia de cambio climático son varios, se mencionan aquellos específicos sobre descarbonización y en el establecimiento de las acciones puntuales, objetivos y metas. Estos instrumentos rigen de manera directa las obligaciones de los México y los países en relación con el combate al cambio climático.

1.6.2 Acuerdo de París

Una de las principales razones que comprometieron la implementación del Protocolo de Kioto fueron sus controversias con los países desarrollados, ya que estos tenían compromisos legalmente vinculantes de reducción de emisiones de GEI, por el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas, el cual alude a la responsabilidad histórica de este grupo de países en el aumento de las concentraciones globales de GEI y, en consecuencia, del cambio climático (CMNUCC, 2023).

Estados Unidos señaló que el Protocolo de Kioto inducía condiciones desventajosas para su economía, ya que países como China e India, al considerarse como parte del mundo en vías de desarrollo no contaban con compromisos obligatorios de reducción de emisiones. Se expuso que la economía estadounidense se volvería mucho más vulnerable si este acuerdo entrara en vigor, esta situación se corrigió en el Acuerdo de París de 2015 firmado durante la COP21 y sucesor del Protocolo de Kioto, en el cual nuevamente se reconoce la responsabilidad histórica del mundo desarrollado, pero ahora todos los países signatarios cuentan con compromisos de reducción de emisiones, conocidos como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs por sus siglas en inglés).

México firma este acuerdo desde el 9 de junio de 1998 y el Senado de la República aprobó su ratificación el 29 de abril de 2000. Como parte del esfuerzo global para hacer frente al cambio climático, durante la COP21 en París, Francia, se aprobó el Acuerdo de París sobre Cambio Climático. Y sigue demostrando liderazgo en el combate al Cambio Climático al ser de los primeros países en ratificar dicho convenio; es uno de los 175 países que firmaron el Acuerdo de París, que fue ratificado por el Senado de la República.

El Acuerdo de París es un Acuerdo jurídicamente vinculante, sucinto, universal, durable, con metas de largo plazo, dinámico, con compromisos claros, da relevancia tanto a la mitigación como a la adaptación, reconoce el papel de los bosques y está acompañado de una decisión con un plan de trabajo 2016-2020. Compromete a todos los países Parte a trabajar unidos para mantener la temperatura global por debajo de los 2°C grados centígrados, con miras a lograr que no rebase los 1.5°C grados.

Contiene una meta global de adaptación de largo plazo para incrementar la capacidad adaptativa, fortalecer la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad al cambio climático e incorpora la visión para lograr que los flujos financieros sean consistentes con un modelo de desarrollo resiliente y de bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Pone en marcha un esquema fortalecido de provisión de financiamiento, desarrollo y transferencia de tecnología y de construcción de capacidades, para apoyar a los países en desarrollo en la aplicación de sus medidas, buscando un balance entre mitigación y adaptación.

A partir del 2023 cada 5 años se hará una evaluación de las contribuciones previstas determinadas a nivel nacional (INDC) de mitigación y adaptación al cambio climático, para que los países incrementen sus compromisos. Reconoce que, al emprender acciones climáticas, los países deberán respetar, promover y considerar sus obligaciones sobre derechos humanos, igualdad de género e intergeneracional.

Las acciones concretas enlistadas por México son:

1. Alcanzar una tasa cero de deforestación.
2. Mejorar la capacidad adaptativa de los 160 municipios más vulnerables.
3. Proteger a la población de los fenómenos hidrometeorológicos extremos.
4. Aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica del país y de los ecosistemas.

5. Desacoplar el crecimiento económico de la emisión de contaminantes de efecto invernadero.

1.6.3 Contribuciones Determinadas a nivel Nacional

Las Contribuciones Previstas y Determinadas a nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) constituyen los esfuerzos de los países que son parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y responden a los objetivos globales del acuerdo de París de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero a un nivel de no aumentar la temperatura del planeta por encima de los 2°C. Las NDCs son objetivos de reducción de emisiones nacionalmente determinados, es decir, que previamente a la entrada en vigor del Acuerdo de París, cada país debe de haber consensuado y determinado a nivel nacional su objetivo de reducción de emisiones de GEI.

Para México, el compromiso es reducir por lo menos en 35% las emisiones nacionales GEI al año 2030, considerando un escenario tendencial sin cambios. Dentro de esta meta, el 30% de la reducción de emisiones será mediante recursos nacionales y el 5% mediante cooperación y financiamiento internacional. La meta anterior podrá ampliarse hasta un 40% de reducción de emisiones si la cooperación y el financiamiento internacional y la transferencia tecnológica escalaran significativamente (SEMARNAT e INECC, 2022).

1.7 Nacionales

El cambio climático es un desafío global, que se debe afrontar de manera conjunta por medio de diversos mecanismos multilaterales. México, como un líder global y promotor de una política multilateral transformadora, implementa acciones y políticas públicas en concordancia con los compromisos internacionales adquiridos en materia de cambio climático. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el Artículo 4 establece el derecho a un medio ambiente sano, donde toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar; es el Estado el que debe de garantizar el respeto a este derecho a través de leyes ambientales.

1.7.1 Ley General de Cambio Climático (LGCC)

La Ley General de Cambio Climático (LGCC) es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de México en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico. El objetivo de esta Ley es garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de

facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero.

En su artículo 66 de la Ley General de Cambio Climático señala que el Programa Especial de Cambio Climático (PECC) será elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), con la participación y aprobación de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), en el cual se establecerán los objetivos, estrategias, acciones y metas para enfrentar el cambio climático mediante la definición de prioridades en materia de adaptación, mitigación, investigación, así como la asignación de responsabilidades, tiempos de ejecución, coordinación de acciones y de resultados y estimación de costos, de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo y la Estrategia Nacional de Cambio Climático.

1.7.2 Ley de la Industria Eléctrica

La Ley de la Industria Eléctrica, publicada el 11 de agosto de 2014 en el Diario Oficial de la Federación, tiene como objetivo regular la planeación y el control del Sistema Eléctrico Nacional, el Servicio Público de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica. Incluye también el fin de promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica, a la vez de garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal, de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes.

1.7.3 Ley de Transición energética

Finales de 2015, se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley de Transición Energética con la finalidad de regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos. Asimismo, en su artículo 2, se establece como uno de sus objetos el apoyar lo estipulado en la propia Ley, sobre las metas de reducción de emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero y de generación de electricidad provenientes de fuentes de energía limpia.

1.7.4 Estrategia Nacional de Cambio Climático

La LGCC señala la necesidad de contar con instrumentos de planeación de corto, mediano y largo plazo para la dirección de la acción climática.

Para esto indica que deben existir cinco instrumentos de planeación: 1) la Estrategia Nacional; 2) el Programa Especial; 3) la Política Nacional de Adaptación; 4) las contribuciones determinadas a nivel nacional; y los Programas de las entidades federativas.

Como parte de esta estrategia, se establece dentro de los instrumentos de política nacional en materia de cambio climático, el Programa Especial de Cambio Climático (PECC) para abonar y atender el cumplimiento de las NDC y otros compromisos ambientales entre el periodo 2021-2024, teniendo como finalidad el tránsito hacia una economía y actividad humana menos intensiva en carbono, al mismo tiempo que se incrementa la capacidad adaptativa de los sistemas naturales y humanos, a través de acciones contundentes con perspectiva de género, procuración de justicia ambiental, respeto a los derechos humanos, entre otros aspectos de relevancia para el gobierno .

El PECC consta de cuatro objetivos prioritarios, entre ellos el de “reducir las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero a fin de generar un desarrollo con bienestar social, bajo en carbono y que proteja la capa de ozono, basado en el mejor conocimiento científico disponible”. Establece 24 Estrategias prioritarias, como la de “impulsar políticas y acciones de movilidad sostenible con el fin de promover transportes eficientes, de bajo carbono, y asequibles para la población”, a realizar mediante 169 acciones puntuales que integran el PECC 2021-2024, el compromiso de atender los problemas públicos derivados del cambio climático, asumiendo la responsabilidad de disminuir la vulnerabilidad de la población, la biodiversidad, los sectores productivos y la infraestructura, considerando estrategias transversales que apoyan los procesos para fortalecer la seguridad alimentaria y la gestión de los recursos hídricos ante un contexto de cambio climático. De igual manera reafirma su responsabilidad impulsando acciones que contribuyan a reducir las emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero.

2. Descarbonización del transporte aéreo

El transporte aéreo, incluyendo las aerolíneas y las empresas operadoras en general, pueden introducir numerosas medidas para reducir su impacto en el medio ambiente y contribuir a la descarbonización global. Esto se puede dar a través de mejoras en sus procesos operativos que permitan reducir consumos energéticos, consumos de agua, manejo de residuos, sustitución de materiales más amigables o reciclables, donde tengan pertinencia, e incluso aplicar medidas de atenuación del ruido, especialmente al sobrevolar espacios urbanos. En general, esto apuntaría a un transporte aéreo más sostenible. Dentro de estas medidas, están las que se deben de tomar con más urgencia, aquellas que involucran la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero involucradas en el calentamiento global.

La Asamblea de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, o ICAO por sus siglas en inglés) celebrada en 2019 estableció el objetivo de evitar el crecimiento de la emisión de GEI causadas por la aviación a partir de 2020. Sin embargo, aunque la tendencia era el aumento de las emisiones, fue el año que tuvo lugar la pandemia por COVID-19, disminuyendo significativamente las emisiones en la aviación, aunque solo durante su ocurrencia, volviendo a la tendencia de crecimiento de emisiones después de esta. El objetivo que busca la OACI es no incrementar las emisiones a lo largo del tiempo, manteniendo el número de vuelos.

El planteamiento es lograr ajustar la línea de crecimiento de las emisiones GEI, en el supuesto de no aplicar ninguna medida de contención, a la línea objetivo (Figura 2.1). Algunos países, como Alemania y Francia, están aplicando algunos mecanismos de carácter normativo o fiscal, sin embargo, estas actúan directamente sobre la demanda de transporte aéreo. También están las organizaciones partidarias de sustituir el avión por medios considerados más sostenibles como lo son el ferrocarril (Mateu, 2022).

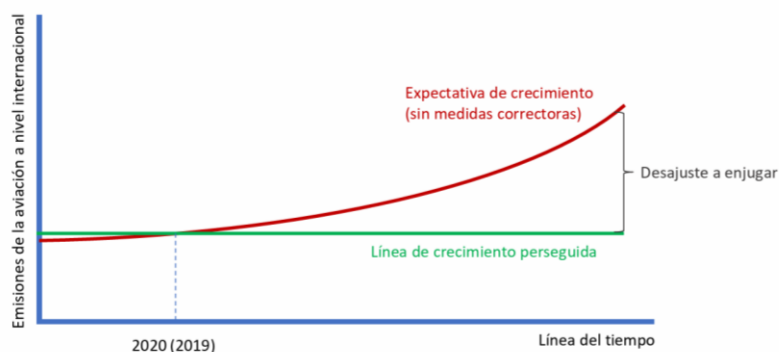


Figura 2.1 Contribución de emisiones en la aviación internacional

Fuente: Mateu, 2022.

2.1 Líneas de acción

Con este objetivo, la Asamblea de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) plantea cuatro líneas de acción para lograr ajustar las emisiones que se prevén tener en el transporte aéreo y las planteadas como metas. Estas se desglosan a continuación.

2.1.1 Mejoras tecnológicas de las aeronaves

Con el fin de reducir costos, los fabricantes de aeronaves han ofertado nuevos modelos, esto está impulsado por el costo que tiene el combustible en la aviación. Y las mejoras de las propuestas de las nuevas aeronaves ha sido tan exitosa que muchas de las aerolíneas están adoptando la política de renovar su flota. Esto, tiene un efecto indirecto en las emisiones de GEI, dado a que el cambio conlleva a reducir el consumo de combustibles de origen fósil. Los ahorros de combustible van de entre el 15% al 40%, dependiendo del avión, que bien reditúan la inversión de las aerolíneas en la renovación de las aeronaves.

Otra mejora tecnológica que aporta a la reducción de emisiones por el ahorro de combustible son el lanzamiento de los aviones jet ultraligeros (very light jets) usados principalmente en la aviación corporativa. La mejora en los motores y el aligeramiento de los materiales redujeron el costo de estas aeronaves y su mantenimiento, haciéndolos más asequibles.

Aunque algunos de estas mejoras tecnológicas, no fueron con fines ambientales, los avances ya materializados son un aventajamiento, haciendo que este camino tenga poco por recorrer sino es que ya está en su límite. Sin embargo, la OACI reta mejorar en al menos 2% la tecnología de los aviones sobre el rendimiento de sus combustibles, aunque se

pronostica habría que esperar algo más radical a lo ya implementado para tener reducciones de emisiones más significativas, esperando, por ejemplo, el desarrollo de motores híbridos o eléctricos, los cuales son retos aún demasiado ambiciosos para la aviación.

Se tendría que lograr avances muy significativos en los dispositivos de almacenamiento de energía o baterías para poder hablar de implementar como ruta de descarbonización del transporte aéreo la inclusión de motores eléctricos. Sin embargo, empresas como Easyjet y Viva Aerobus han buscado aliarse con las entidades aeroespaciales y proveedoras de servicios aeronáuticos para desarrollar el proyecto Wright Electric que propone una aeronave totalmente eléctrica. Este proyecto, pretende el desarrollo de una aeronave para cien pasajeros con autonomía de una hora de vuelo. Su Libro blanco sobre almacenamiento de energía explora dos tecnologías alternativas, la pila de combustible de hidrógeno (hydrogen fuel cell) y la pila de combustible de aluminio (aluminium fuel cell). Sus desarrolladores estiman contar con una aeronave comercial para el año 2026, aunque el costo no sería equiparable a los de las aeronaves convencionales actuales hasta 2030.

2.1.2 Mejoras en la operación

Esta es la segunda línea propuesta por la OACI para las reducciones de GEI en la aviación. Las acciones que se pueden llevar a cabo en ese sentido son muy amplias, pero las podemos englobar en las siguientes medidas:

- Mejorar la eficiencia de las aeronaves. Mantenimientos adecuados, reducciones en los pesos de carga y viajar aprovechando toda la capacidad de los aviones de pasajeros.
- Optimizar las operaciones en vuelo y tierra. En vuelo, ajustar las rutas buscando zonas con menores resistencias al aire, y en tierra, mejoras en las trayectorias de aterrizaje y despegue, así como optimizar los recorridos en tierra. Otros, como la navegación basada en el desempeño (PBN, performance based navigation) que es la mejora en la captación de datos.
- Medidas de gobernanza y relacionadas con las personas. Fijar metas específicas, la asociación con otras aerolíneas y entidades para poder tener mayor alcance en las medidas adoptadas, entre otras acciones.

2.1.3 Uso de combustibles no fósiles

Esta es una de las opciones a corto plazo con mayor potencial para la reducción de emisiones. El uso de biocombustibles no fósiles o sostenibles,

proviene de fuentes como la biomasa, lo que puede tener su complejidad, ya que requieren del uso de la tierra que podría competir con plantaciones para diferentes fines, como el alimentario. Esto, podría ser desfavorecedor, sobre todo en territorios cuya población no tiene suficientes alimentos. Como esto puede llegar a ser una realidad, se impulsó el desarrollo de una segunda generación de biocombustibles, denominados biocombustibles (o biocarburantes) avanzados.

Estos provienen de residuos vegetales y animales como lo son residuos generados en la industria agroalimentaria, la pesca, residuos de la comercialización de estos productos, entre muchos otros. Aunque aún en desarrollo, existen prometedores avances en la producción de biocombustibles, como lo son los propuestos a partir del cultivo de algas, y los procedentes de aceite de cocina usado y residuos de grasas animales.

El origen de los llamados combustibles sostenibles es muy diverso, incluye incluso combustibles provenientes de aceites industriales y plásticos. El aprovechamiento de los residuos provenientes de otras actividades o procesos pareciera tener ventajas sobre el impacto ambiental, dado otro destino a estos diferente a su disposición. Sin embargo, hay controversias sobre que esto sea así, ya que estos residuos en lugar de tener una descomposición natural a largo plazo, en la cual también lleva una liberación de CO₂, lo harán de manera inmediata en la quema. Siendo que la meta que se busca en la reducción de CO₂ en un corto plazo, se tiene que hacer un análisis bien planteado de como su uso contribuirá a reducir gases GEI.

Otra variable para analizar es en el caso de biocombustibles de origen vegetal, ya que el ciclo completo del CO₂ puede variar según el origen vegetal: maíz, palma, soja, etc., además, la misma producción del biocombustible y energía. La búsqueda de combustibles alternativos que minimicen la huella de carbono al tiempo que otros potenciales inconvenientes de los biocombustibles es una línea de investigación necesaria. Algunos autores denominan a estos como combustibles sintéticos, dado que requieren de cierto proceso de transformación. La lógica detrás de estos combustibles es la captura y uso del CO₂ durante su proceso de producción. Para impulsar la transición hacia los combustibles no fósiles, se están llevando prácticas como la mezcla a distintos porcentajes de estos combustibles con los de origen fósil, hasta llegar al uso completo de biocombustible.

2.1.4 Compensación de emisiones

La cuarta línea de acción es la compensación de emisiones, esto se refiere a realizar acciones que compensen la emisión de GEI que tiene el transporte

aéreo. La implementación por parte de algunas aerolíneas de programas de compensación de su huella de carbono han sido como los programas vuelo neutro que, por una tarifa extra menor al 1% del pasaje puede hacer la compensación de emisiones del viaje, sin embargo, asume que el pasajero conoce la emisión de GEI en las que se incurre en un vuelo y a una conciencia del cambio climático, lo que no es una estrategia muy popular en los usuarios.

Muchas otras aerolíneas, han asumido los costos de la compensación, y darle el valor agregado de sostenibilidad a su oferta e imagen. Las acciones por tomar pueden ser muy variadas, desde la promoción de plantar árboles o plantas que realicen captura de carbono compensando el que se genera al quemar los combustibles fósiles, a instrumentos más complejos, pero ya validados para reconocer su contribución en la reducción de GEI, como lo son los offsets o unidades de emisión de las que hablamos en el siguiente apartado con la situación nacional. Estas medidas no deben considerarse en forma aislada, sino en combinación para alcanzar en forma exitosa los objetivos de descarbonización y pueden ser muy variadas; en la Figura 2.2 se muestra algunas implementadas en algunos países en diferentes líneas de acción.

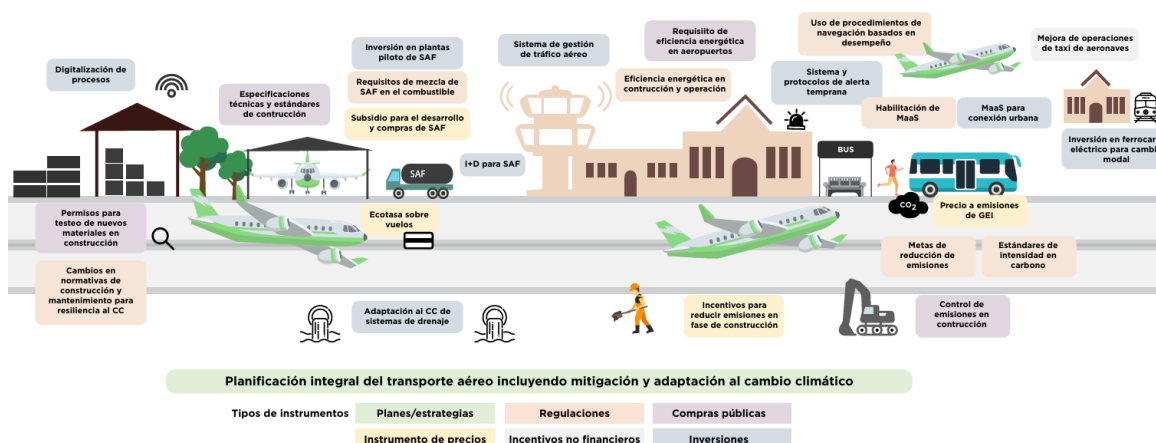


Figura 2.2 Descarbonización del transporte aéreo

Fuente: Calatayud, 2023.

Por otra parte, la OACI está abordando la compensación a nivel agrupado; ha definido un plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional (CORSIA, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation). El Plan consta de tres fases: dos fases iniciales voluntarias (2021-2023 y 2024-2026) y una fase obligatoria que tendría lugar a partir de 2027. CORSIA sólo se aplica a vuelos internacionales. Las

emisiones nacionales son competencia de otra agencia de la ONU, la CMNUCC, y están cubiertas por el Acuerdo de París.

2.2 Situación nacional

México se ha incorporado al esquema de compensación y reducción de carbono para la aviación civil (CORSIA) como parte de su compromiso a reducir sus emisiones netas de CO₂, siendo uno de los 119 Estados que se han pronunciado a participar para el 2024. La OACI ha reconocido que las mejoras de tecnologías para la aviación, las mejoras operativas y el desarrollo de combustibles alternativos podrían no ser suficientes para alcanzar la cantidad de reducciones de CO₂ requeridas para las metas planteadas.

CORSIA es un programa, en el cual se pretende utilizar reducciones de emisiones u offsets para compensar las emisiones de CO₂ de la aviación internacional. Un offset o unidad de emisión son commodities ambientales que permiten a los participantes de la economía pagar por la reducción de emisiones generada en otro lugar; son una alternativa a lograr la neutralidad de carbono cuando las estrategias de mitigación directa se han agotado o no son rentables (MxCO₂). Cada reducción de emisiones equivale a una tonelada de dióxido de carbono equivalente (1 tCO₂e) evitada, reducida o removida de la atmósfera por efecto de la actividad de un proyecto de carbono. Para garantizar su integridad ambiental, las reducciones deben de cumplir con: ser reales y adicionales, transparentes, medibles, permanentes, verificadas, sincrónicos, exigibles, registradas trazables, retirables, deben de tomar en cuenta las posibles fugas de GEI y evitar la doble contabilidad.

Para asegurarlo, deben de desarrollarse a través de protocolos aprobados por programas o estándares internacionalmente reconocidos y ser verificados por terceras partes. Si el proyecto cumple con los requerimientos y se registra ante alguno de los estándares, el estándar emitirá en una cuenta de propiedad del desarrollador del proyecto la cantidad de offsets equivalentes a las reducciones reportadas en la verificación, entonces, estos pueden ser comercializados en los esquemas como CORSIA.

Las aerolíneas mexicanas que realicen vuelos al extranjero deberán prepararse para cumplir por las regulaciones de CORSIA desde la fase piloto (2021-2023) y tendrán que compensar, a través de offsets elegibles, de manera obligatoria las emisiones que hayan sobrepasado las tomadas como línea base el año 2020. La incorporación de México a este esquema, su cumplimiento y las acciones que tomará para el monitoreo, reporte y verificación para cuantificar sus emisiones, dará paso al crecimiento

sostenible del transporte aéreo en el país, facilitará la adopción de estrategias para mitigar los efectos del cambio climático y abrirá el camino a las empresas resilientes y adaptadas a la crisis climática que enfrentamos.

Aunque se ha reafirmado la necesidad de evolucionar hacia combustibles alternativos y mejoras tecnológicas, como los aviones eléctricos, estos aun presentan un largo tiempo de maduración, además de asumir cambios en la infraestructura aeroportuaria para el uso de electricidad, hidrógeno u otros combustibles. Aún no se tienen adoptadas medidas para el uso de combustibles de aviación sostenibles (CAS).

3. Descarbonización del transporte marítimo

La descarbonización del transporte marítimo requiere la integración de medidas de las políticas para este subsector y de otros sectores de gobierno. En este caso, si el transporte marítimo se contabiliza a nivel regional, su contribución sería marginal, sin embargo, si lo exponemos a nivel global, representa cerca del 3% de las emisiones GEI; es decir, si este subsector fuera un país estaría en el sexto lugar de emisiones globales.

La Organización Marítima Mundial (OMI), que es el organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques. La OMI publicó en 2018 la denominada “Estrategia Inicial” para avanzar en la descarbonización del subsector y evitar que se materialicen los escenarios BaU (Business as Usual), que representan un escenario en donde no existe una limitación sobre las emisiones de GEI, el cual estima un incremento entre 90% y 130% de las emisiones hacia 2050, respecto a los niveles de 2008. Esta estrategia fue revisada en julio de 2023, estableciendo metas más ambiciosas para el subsector.

3.1 Neutralidad de carbono 2050

La revisión de la estrategia de la OMI fija como meta alcanzar neutralidad de carbono en el transporte marítimo internacional para 2050, tomando como base el año 2008. Para ello, se recomienda incrementar la eficiencia energética en las operaciones marítimo-portuarias, reconociendo que en este subsector el mayor impacto de reducción de emisiones GEI provendrá de la transición hacia combustibles limpios o emisiones cero de carbono.

Traspassando las fronteras nacionales, la estrategia de la OMI identifica medidas de corto, mediano y largo plazo a ser implementadas a nivel global (Figura 3.1). Una medida de cumplimiento obligatorio es la reducción en 30% de la intensidad en carbono de nuevos buques para 2025 y del 40% de todos los buques para 2030, de acuerdo con el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI, por sus siglas en inglés). Sin

embargo, las recomendaciones son de carácter voluntario, incluyendo la elaboración de Planes de Acción a nivel nacional que consideren el fortalecimiento institucional y legislativo para incentivar la transición energética, el apoyo a la investigación sobre fuentes de energía para el subsector y la facilitación del desarrollo de infraestructura verde. Muy probablemente surjan nuevas medidas de carácter obligatorio para la industria y los Estados a partir de las próximas rondas de negociación entre 2024 y 2026.

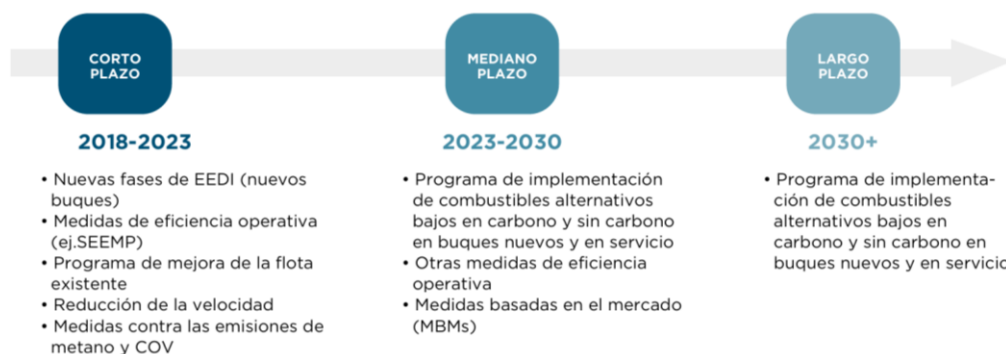


Figura 3.1 Medidas para reducir el transporte marítimo

Fuente: Organización Marítima Internacional, 2018.

3.1.1 Línea base

Tomando en consideración las directrices de la OMI, países como Alemania e India, han formulado o actualizado sus planes y estrategias hacia la reducción de emisiones GEI, a través de la migración de la electrificación de las operaciones a corto plazo hacia fuentes renovables de energía (solar o eólica) y a largo plazo al hidrógeno y amoníaco. Otros países, como Reino Unido y Singapur, basan sus estrategias de transformación energética identificando requerimientos normativos, de infraestructura y financieros. Cualquiera de las estrategias tomadas, el primer paso es el de la recolección, sistematización y actualización de datos, siendo clave para establecer la línea base de emisiones GEI.

Alcanzar objetivos de reducción de GEI requiere medidas transversales de conservación y eficiencia energética. Hablando de eficiencia energética, este subsector se caracteriza por ser mucho más eficiente que el carretero, férreo o aéreo, consumiendo 20% de la energía total empleada en transporte para mover el 90% de la carga mundial, existen muchas oportunidades de mejora para reducir su consumo de energía. En algunos países, los planes nacionales para el subsector establecen lineamientos generales para las medidas a adoptar, en otros, las autoridades portuarias

son las encargas de determinar las medidas en las terminales, y para los transportistas y navieras.

Los cinco instrumentos de políticas implementar para el subsector son: regulaciones que limitan la emisión de GEI, procesos de adquisiciones que incluyen criterios medioambientales, mecanismos de precios, incentivos no económicos, e inversiones del sector público.

3.1.2 Medidas regulatorias

Las medidas regulatorias más utilizadas a nivel de terminal son la fijación de un tope de emisiones, la reposición de equipos y vehículos por aquellos que usen energía eléctrica, el uso de energía eléctrica por parte de los buques atracados y la utilización de un porcentaje de energía renovable en las operaciones. Un ejemplo es Singapur, que ha establecido que para 2030 todas las embarcaciones que operen en el puerto utilicen energía baja en carbono, y para el 2050, deberán ser eléctricas o utilizar energías cero netas. En ese sentido, la UE estableció el Pacto Verde 2021, que establece que en 2050 las ciudades-puerto de esta región deben reducir sus emisiones en un 90%; India por su parte, estableció la meta de que en el 2030 el 60% de la energía utilizada en sus puertos sea de fuentes renovables.

En el caso de las regulaciones para la industria marítima, el EEDI, el Plan de Manejo de Eficiencia Energética en Buques (SEEMP, por sus siglas en inglés) y las zonas de emisiones controladas son las que poseen mayor adhesión internacional. Las dos primeras son requeridas a nivel internacional para un número cada vez mayor de buques, alineado a la OMI, para reducir el consumo energético y emisiones. La tercera ha sido adoptada por diferentes países avanzados con el objetivo de mejorar la calidad del aire en el área portuaria urbana. Aquí podemos mencionar estrategias como la de Corea, donde limita el uso de combustible con contenido de sulfuro menores a 0.1%, o de la iniciativa de la limitación del de combustible con contenido de carbono como de “FuelEU” de la EU, con el planteamiento de una reducción escalonada partiendo del 2% en 2025 hasta del 75% en 2050.

3.1.3 Procesos de adquisiciones con requerimientos medio ambientales

Recientemente se han incorporado requerimientos medio ambientales en las licitaciones de obras y servicios portuarios, principalmente como la utilización de sistemas de gestión y monitoreo ambiental, objetivos de desempeño energético, el empleo de fuentes renovables de energía y especificaciones técnicas para limitar emisiones. En Rotterdam, la

expansión de Maasvlakte 2 en el puerto se resaltó la promoción del cambio modal como criterio la convocatoria de propuestas; y en España, se incluye la intensidad de carbono como criterio a evaluar en las concesiones de servicio de remolcadores.

3.1.4 Mecanismos de precios

Existen diferentes incentivos basados en precios para promover la eficiencia energética, el más utilizado es cobrar una menor tasa portuaria a aquellos buques que tienen un menor impacto ambiental, estimado según las características del buque. A nivel internacional se cuentan con varios índices que realizan estas mediciones, como GHG Emissions Rating, el Environmental Ship Index (ESI), el Green Award y el Clean Shipping Index. El puerto de Hamburgo ha otorgado descuentos de hasta 3,000 euros en tarifas portuarias para buques con mejores puntajes en el ESI; Buenos Aires otorga descuentos de hasta del 10% en tarifas portuarias para los buques menos contaminantes. En casos como los de Los Ángeles y Long Beach, la navegación lenta también es recompensada con menores tasas.

Otro instrumento muy popular es subsidio a proyectos de eficiencia energética en activos y operaciones portuarias, ya sea vía exención impositiva o contribución a fondo perdido. Estados Unidos otorgó fondo por 150 millones de dólares para la electrificación de equipos portuarios y 100 millones de dólares para proyectos que apunten al despliegue de infraestructura solar offshore a través de su Ley Bipartidista de Infraestructura de 2021.

El Carbon pricing (precio de carbono) establece un precio por unidad de emisión de carbono (o GEI) con el objetivo de internalizar el impacto negativo del transporte marítimo en el medio ambiente e incentivar la innovación y transición energética a fuentes sostenibles. Aquí, los mayores avances los ha realizado Singapur y China. Singapur ha establecido el mercado Climate Impact X, donde permite financiar proyectos que van desde restauración de manglares hasta mejora de la resiliencia al cambio climático en zonas costeras. Por otro lado, hay países que ha optado por la aplicación de impuestos ambientales, como Suecia, sin embargo, el carácter global del transporte marítimo hace difícil la implementación de un esquema de precio de carbono a nivel nacional. Por ello, la estrategia de la OMI está contemplando el establecimiento de un esquema internacional a mediano plazo.

3.1.5 Incentivos no económicos

Algunas autoridades portuarias o terminales dan prioridad de amarre o de paso a buques con mejor calificación en los índices de emisiones, como es el caso del Canal de Panamá. Otras han facilitado la implementación de pilotos con nuevas tecnologías para el monitoreo de emisiones en tiempo real, la optimización de operaciones con inteligencia artificial y la automatización de equipos, entre otros, con el fin de reducir el consumo energético. Este es el caso de puertos como Singapur, Rotterdam, Hamburgo y Shanghái.

3.1.6 Inversiones del sector público

Estas apuntan principalmente a proveer de energía renovable para las operaciones portuarias, un ejemplo es la producción de energía eólica offshore de Estados Unidos y Australia. El desarrollo de plataformas digitales que simplifiquen, generen y centralicen los procesos de información para la mejor planificación y sincronización con el objetivo de reducir las emisiones, dentro y fuera del mar. Estos productos de gestión pueden generar importantes reducciones de GEI, como es el caso de Valparaíso, que obtuvo un 84% de reducciones de las emisiones de CO₂ de las actividades entre 2007 y 2012, empleando un sistema de gestión e intercambio de información entre procesos de naviera, terminales y transportistas (Puerto Valparaíso, 2014).

Cumplir con las metas internacionales requerirá migrar hacia el uso de combustibles cero emisiones o más limpios en el transporte marítimo. La optimización logística, el rediseño de embarcaciones y de los sistemas de navegación podrían reducir la intensidad de emisiones hasta en 55%, dejando lugar a los nuevos combustibles para cubrir el porcentaje restante. A la par del desarrollo de combustibles, está en desarrollo de nuevos motores y una nueva generación de buques, así como también la modernización de la infraestructura portuaria y energética. Global Maritime Forum estima que las inversiones necesarias para alcanzar las metas de la OMI a 2050 se ubican en torno a 1 billón de dólares, destinando el 90% a infraestructura de producción, almacenamiento y transmisión de energía, y lo restante a la industria naviera. En comparación, en 2022 las inversiones globales en energía fueron de 2.5 billones de dólares (IEA, 2023b). Para ser consistente con estrategia de la OMI, en 2030 el 5% del combustible utilizado en el subsector deberá ser limpio.

En el caso de políticas públicas, los planes y estrategias marítimo-portuarias priorizan la descarbonización como un objetivo importante del subsector, identificando también los tipos de combustible para generar la transición. El hidrógeno y el amoníaco son los encabezan la lista en Reino

Unido, Japón, India, Alemania y Corea por ser denominados combustibles verdes (Figura 3.2). Se han realizados hojas de ruta para el desarrollo del hidrógeno que proponen al transporte marítimo como uno de los principales usuarios de este combustible, especialmente en los casos donde la industria marítima juega un rol importante en la economía nacional, como en Singapur; Dinamarca igualmente ha desarrollado una hoja de ruta de hidrógeno especialmente para el transporte marítimo, donde se establecen lineamientos en materia de políticas y regulaciones, infraestructura, tecnología y seguridad.

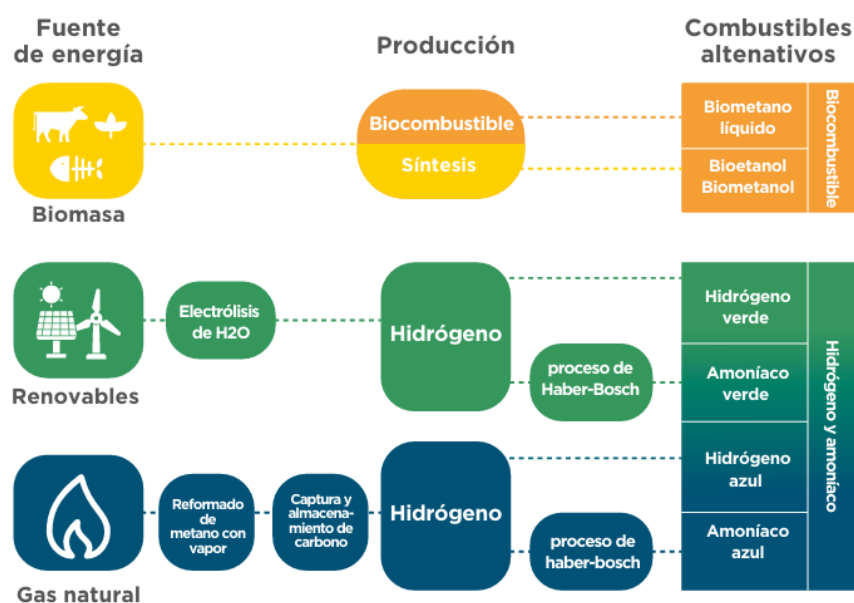


Figura 3.2 Combustibles alternativos y su producción

Fuente: Global Maritime Forum, 2022.

Las regulaciones tienen el doble propósito de impulsar la transición energética y velar por la seguridad; el desarrollo de nuevas embarcaciones e infraestructura, así como la gestión de nuevas fuentes de energía requerirá de la expedición de estándares de seguridad para su producción, gestión y disposición. En particular, el amoníaco es altamente nocivo para la salud, inflamable y corrosivo, por lo que supone riesgos importantes para el medio marino y los seres humanos. En todo caso, la regulación debe dar espacio a la innovación, para lo cual resultan útiles los marcos regulatorios para las empresas emergentes o innovadoras, para realizar experimentos en vivo en un entorno controlado (sandboxes). Estos podrían ser aplicados al despliegue de buques con nuevos combustibles y al desarrollo de corredores verdes, lo cual está siendo actualmente estudiado en Singapur.

3.2 Situación en México

Los puertos del Golfo de México, Mar Caribe y del Pacífico colocan al país en una posición estratégica a nivel mundial, permitiendo la importación y exportación de bienes a través del transporte marítimo, haciendo que esta actividad se convierta en uno de los principales motores de crecimiento económico. Sin embargo, estos beneficios económicos vienen acompañados con una importante emisión de gases GEI. De acuerdo con el Inventario Nacional de emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, la flota nacional emite aproximadamente 1.55 millones de toneladas de CO₂e por consumo de combustible. Para la flota de altura existen diversos cálculos, como el de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), que reporta 11 millones de toneladas de CO₂, o el de la Comisión para la Cooperación Ambiental de Norteamérica (CCA) que calcula 178 millones de toneladas de CO₂, y el de Fuentes García y otros investigadores, que menciona hasta 400 millones de toneladas CO₂.

A lo anterior, habría de sumarse las emisiones de los equipos para el manejo de la carga en las terminales de los puertos (grúas y montacargas), que se estima es de aproximadamente 1.9 millones de CO₂, en 2011 según el estudio de Reducción de emisiones generadas por el movimiento de bienes en el transporte marítimo en América del Norte-Actualización de datos de emisiones en puertos mexicanos, de la CCA.

La descarbonización marítima-portuaria en México tiene un gran potencial para contribuir al cumplimiento de los compromisos internacionales y nacionales. En el subsector de transporte marítimo, el uso de combustibles renovables, la eficiencia energética, el mantenimiento y la implementación de medidas operativas (muchas de ellas recomendadas por la Organización Marítima Internacional), son viables para los puertos mexicanos. El uso de energía renovable en el país se ve favorecido por su ubicación al centro comercial entre América del Norte y del Sur. Además, la extensión de sus litorales hace que cuente con una vasta región marina donde las condiciones oceanográficas son propicias para la existencia de intensas corrientes marinas, así como una variedad importante de rangos de marea que podrían ser aprovechables como fuente alterna de energía renovable

Si México, adopta tecnologías de propulsión de carbono cero en sus puertos de México, se estima (P4G, 2021) podría atraer inversiones de entre 130 a 188 mil millones de pesos en infraestructura terrestre para el año 2030. Asimismo, en el estudio *Shipping's energy transition: strategic opportunities in Mexico*, se hace una nueva cuantificación de emisiones de GEI y se hacen recomendaciones para lograr la descarbonización de puertos y transporte marítimo en México.

El estudio Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación elaborado por la Agencia GIZ indica que, si México detona el mercado de hidrógeno verde hacia 2050, se estima que genere 90,000 empleos directos en la producción, estaciones de recarga, operación y mantenimiento.

Sin embargo, la descarbonización marítima-portuaria requiere acciones integrales y coordinadas entre gobierno, sociedad, academia y sector privado. Iniciando por la generación de datos, inventarios e información pública, accesible y actualizada periódicamente. Requiere emitir regulaciones sobre las emisiones de GEI y otros contaminantes atmosféricos, así como instrumentos de política pública que incluyan compromisos, objetivos y estrategias de descarbonización a nivel sectorial.

Se requiere adquirir capacidades y entrenamiento en la implementación de medidas operativas y de eficiencia energética para la reducción de emisiones de GEI. Y realizar el financiamiento, implementar incentivos y propulsar el desarrollo tecnológico para energías e implementaciones en los puertos y ciudades portuarias.

Sin embargo, para desbloquear estas oportunidades es esencial contar con un marco político y financiero facilitador capaz de motivar y convocar de manera efectiva a actores clave en todos los sectores y cadenas de valor, así como de permitir las alianzas estratégicas para explotar el potencial en cuanto a acciones medio ambientales se refiere. Actualmente, México carece de un ecosistema favorable tanto política como financieramente para aprovechar los beneficios de la producción y el uso de los combustibles escalables de cero emisiones (SZEF), como el hidrógeno verde y el amoníaco, los cuales se consideran los combustibles más prometedores para la transición energética del transporte marítimo. Esto, especialmente derivado de la preferencia de la actual administración por continuar explotando los recursos de combustibles fósiles del país.

4. Descarbonización del transporte terrestre

El desafío de descarbonizar el transporte es un trabajo y compromiso multisectorial, ya que se requiere significativas inversiones en infraestructura tanto para los sectores de energía como de transporte. El sector energético juega un papel clave como proveedor de energía mediante fuentes limpias como reemplazo a los combustibles fósiles para tener reducciones en las emisiones de CO₂ y GEI que verdaderamente impacten.

El transporte es el segundo sector que más contribuye a las emisiones GEI a nivel mundial (con 6.9 giga toneladas de CO₂eq en 2018, o 14.2% de las emisiones totales), con una tasa de crecimiento anual del 1.9%. Dentro del sector, los vehículos de pasajeros son los mayores contribuidores (45%), seguidos por los vehículos de carga (29%) y la aviación internacional y doméstica (12%).

Las emisiones que componen un sistema de transporte dependen de la demanda de traslado, ya que esta está en función del desarrollo urbano, la actividad económica, la cadena de suministro, la capacidad de adquisición y el comportamiento de los usuarios. Se requiere infraestructura vial y vehicular para atender la demanda de traslado, como lo son carreteras, vías, puertos, aeropuertos, banquetas, vehículos y energía para operarlos, infraestructura energética para generar, distribuir y surtir esa energía que ha sido generalmente como combustibles fósiles.

Los traslados resultan en una distribución del uso de diversos medios de transporte, cada uno con una demanda energética y una emisión en base a su combustible, eficiencia y tecnología. El uso de esta energía, como ya hemos visto, genera las emisiones GEI y otros contaminantes que afectan la calidad del aire y la salud de los habitantes. Una alta demanda de traslado en ciertas vías y tiempos puede generar un efecto de congestión que resulta en impacto negativo a la productividad, a la eficiencia del sistema de transporte y mayores emisiones en general.

4.1 Transporte carretero

Durante las últimas tres décadas, las emisiones de CO₂ del transporte por carretera a nivel global se incrementaron en más del 80%, ascendiendo al 74% de las emisiones totales del sector. En la región, el modo carretero es responsable de más del 90% de las emisiones del transporte (IEA, 2022). En este sentido, las estrategias de reducción de emisiones dirigidas al modo carretero tienen gran potencial para disminuir el impacto del sector sobre el cambio climático; es fundamental mitigar las emisiones por este tipo de transporte para avanzar en la descarbonización del sector.

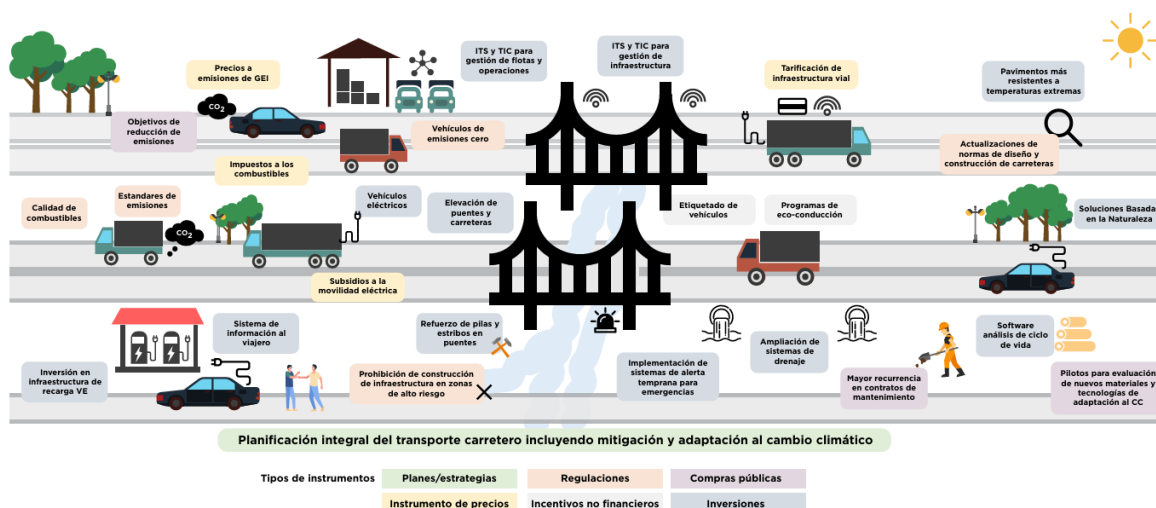


Figura 4.1 Algunas medidas de descarbonización en el transporte carretero

Fuente: Calatayud et al., 2023.

En los últimos diez años, todos los países han elaborado un conjunto de políticas que promueven la mitigación de emisiones y la adaptación del transporte al cambio climático. Aunque las estrategias tienen variantes, y enfatizan diferentes modos de transporte de acuerdo con su importancia a nacional, la tendencia general en los países referentes puede resumirse en cinco grandes áreas de acción: i) la priorización de la descarbonización y adaptación en los planes sectoriales; ii) la disponibilidad de una batería de instrumentos para promover acciones en materia de descarbonización y adaptación; iii) modernización institucional para asumir la tarea de planificar, coordinar y supervisar dichas acciones; iv) estrecha colaboración y coordinación con otras agencias de gobierno; y v) generación de alianzas con el sector privado, la academia y la sociedad civil. En la Figura 4.1 se muestran algunas de las medidas de mitigación en el transporte carretero.

Los planes nacionales y las estrategias de transporte de los países referentes reconocen la importancia del modo carretero para la

descarbonización. Algunos países han establecido objetivos concretos en términos de reducción de emisiones. Por ejemplo, en su plan 2030/2040/2050, la autoridad de carreteras del Reino Unido estableció como objetivo alcanzar cero emisiones a 2030 para las emisiones de la autoridad, a 2040 para las operaciones de mantenimiento y construcción y a 2050 para el tráfico que circula por las carreteras (National Highways, 2021). También se está avanzando en el establecimiento de estrategias a nivel subnacional. Por ejemplo, en el marco de la “Ley Bipartidista de Infraestructura”, Estados Unidos creó el “Programa de Reducción del Carbono” para financiar proyectos de reducción de emisiones de CO₂ procedentes del transporte carretero. El Programa requiere que cada Estado elabore una estrategia de reducción del carbono para este modo a más tardar dos años después de su entrada en vigor, además de actualizar dicha estrategia al menos cada cuatro años (FHWA, 2023). Adicionalmente, una medida para avanzar en la descarbonización es la mejora de la integración del transporte carretero con otros modos de transporte -como el transporte marítimo y ferroviario-, así como también la integración entre el transporte de carga de larga distancia y el transporte urbano de carga. Así, por ejemplo, el Plan de Descarbonización del Transporte del Reino Unido aborda específicamente la descarbonización multimodal y los factores clave (Department for Transport, 2021).

Los instrumentos de precios para las emisiones del transporte carretero son ampliamente utilizados, aunque con diferencias significativas en su alcance. En general, es posible identificar tres tipos de impuestos y cargos dependiendo de la base que consideran para su aplicación: impuestos a la energía (incluyendo los impuestos al CO₂), impuestos a los vehículos y cargos a la infraestructura (Schroten y Scholten, 2019). En la UE, todos los países miembros aplican impuestos sobre el combustible, aunque los niveles impositivos varían considerablemente de un país a otro, con un menor gravamen en general para furgonetas y vehículos pesados por menores impuestos al diésel en relación con la gasolina. En algunos países se aplican impuestos específicos sobre el carbono o CO₂ para el transporte carretero, como parte de los impuestos especiales sobre el combustible. Por otra parte, en diciembre de 2022, el Parlamento Europeo y el Consejo de la UE acordaron establecer un nuevo régimen de comercio de derechos de emisión (ETS II, por sus siglas en inglés) que incluye al transporte por carretera. El lanzamiento del nuevo régimen se prevé para 2027 y regulará a los proveedores de combustibles en lugar de a los consumidores finales, imponiendo un tope absoluto a las emisiones, que disminuirán en función de un factor de reducción lineal. Los derechos de emisión se distribuirán exclusivamente mediante subasta.

Otro instrumento son los cargos por el uso de la infraestructura ayudando a mitigar las emisiones del subsector, al reducir la demanda e incrementar la eficiencia. Los cargos basados en la distancia se encuentran ampliamente extendidos. Hungría constituye un ejemplo de la implementación de este esquema, donde la tarifa del peaje basada en la distancia depende del tipo de carretera utilizada, de la categoría del vehículo del motor, así como de su clasificación medioambiental. Por su parte, Nueva Zelanda aplica este esquema a todos los vehículos pesados y a todos los vehículos ligeros diésel, y en todas las vías públicas. Los cargos varían en función de tres factores que incluyen la distancia, el peso del vehículo y la disposición de los ejes, lo que permite estimar tasas proporcionales al desgaste probable que un vehículo genera en promedio en las carreteras.

En adición, los vehículos eléctricos ligeros se encuentran exentos de las tarifas hasta el 2024 (Ministry of Transport., 2021). Ahora bien, resultados recientes para los Países Bajos mostraron que la efectividad depende de la sensibilidad al precio. Mientras que para automóviles de pasajeros pueden conllevar una reducción del 20% en las emisiones de CO₂, estos cargos tendrían un impacto relativamente menor en el caso de los vehículos pesados y vehículos comerciales ligeros, resultando en una reducción del 5% y 8% de las emisiones respectivamente, debido a que este segmento es menos sensible a una variación del precio (Schroten et al., 2022). Ahora bien, generarían importantes incentivos para la optimización logística, incrementando la consolidación y reduciendo los viajes en vacío.

Una práctica para aumentar la efectividad en el instrumento de precios es su combinación. Los impuestos sobre el combustible, incluyendo los de CO₂ y el régimen de comercio de derechos de emisión son más efectivos para reducir las emisiones por el concepto de transporte en carretera ya que a todas las posibles opciones de descarbonización: reducción del número de vehículos en propiedad, vehículos más eficientes en el consumo de combustible, cambio a vectores energéticos bajos en carbono, conducción eficiente, mayor eficiencia del transporte, cambio modal a modos bajos en carbono, limitación de la demanda global de transporte (Schroten et al., 2022).

La política de descarbonización del transporte carretero de carga se apoya en la reposición y renovación de la flota de vehículos pesados por tecnologías de cero y bajas emisiones. Los camiones con tecnologías de cero y bajas emisiones logran reducir las emisiones de carbono hasta en un 63% en comparación con las tecnologías diésel durante toda la vida útil del vehículo. Los diferentes gobiernos se han fijado metas para la

renovación del parque automotor de carga, a la vez que han implementado esquemas de incentivos para el ascenso tecnológico en flota de cero y bajas emisiones en forma de subsidios a la compra de vehículos nuevos, reducciones de aranceles de importación, reducciones de impuestos, inversiones en infraestructura de carga, promoción de investigación y desarrollo, restricciones a la movilidad de vehículos contaminantes y requisitos de circulación. Ejemplos de iniciativas para subsidiar la compra de vehículos se encuentran en Canadá, donde en julio de 2022 se lanzó el programa de incentivos para vehículos medianos y pesados de bajas emisiones (iMHZEV) con un presupuesto de 547.5 millones de dólares canadienses para subsidiar la compra o el alquiler de vehículos medianos o pesados de carga (Government of Canada, 2023).

En Francia, el programa de Bono Ecológico ofrece subsidios de hasta 4.000 euros para camionetas de carga con capacidad inferior a las 2.4 toneladas y con valor inferior a los 60.000 euros (Ministère de l'Économie, 2023). Respecto a las inversiones en infraestructura, en el año 2021 en Estados Unidos se firmó la "Ley Bipartidista de Infraestructura" mencionada más arriba, que dispuso 7,500 millones de dólares para inversión en infraestructura de carga (FHWA, 2023).

Pero también los incentivos no financieros contribuyen a la descarbonización del subsector a través de la sensibilización de los usuarios sobre la reducción de las emisiones de CO₂. El etiquetado vehicular es una exigencia orientada al productor o vendedor de vehículos con el objetivo de que los consumidores puedan visualizar la eficiencia energética de los mismos, a la vez de incentivar a los productores a reducir el consumo de combustible de los nuevos vehículos. El etiquetado adquiere mayor relevancia debido al aumento de los impuestos sobre las emisiones de CO₂ y el incremento asociado del costo del combustible. En este sentido, la Directiva sobre el etiquetado de los automóviles de la UE (Directiva 1999/94/CE) establece que se coloque una etiqueta sobre consumo de combustible y emisiones de CO₂ en los vehículos nuevos a la venta, contribuyendo a la toma de decisiones informadas de los usuarios.

Otro de los incentivos no financieros son los programas de eco-conducción. A través de una serie de recomendaciones sobre la forma de conducir vehículos, estos programas consiguen reducir las emisiones de CO₂ y otros gases, a la vez de generar menores costos de combustible y mantenimiento, y otros beneficios como la profesionalización de los conductores y mayor seguridad vial (Pineda & Xie, 2021). Las reducciones en consumo derivadas de esta práctica pueden llegar a valores de hasta 30%, lo cual también es relevante para vehículos eléctricos ya que puede aumentar su autonomía (BMK, 2021). Dentro de las mejores prácticas de

los programas de eco-conducción se encuentra la consideración de aspectos locales; un plan de estudios sólido; asociaciones con partes interesadas privadas y públicas; la implementación de una fase piloto antes de escalar el programa; la flexibilidad en los métodos de ejecución; mecanismos de seguimiento, evaluación y retroalimentación; y planes de mantenimiento. Canadá y Estados Unidos son considerados líderes en eco- conducción por el programa SmartWay, que proporciona herramientas a los transportadores de carga para mejorar la eficiencia de las cadenas de suministro y reducir el consumo de combustible y generación de emisiones. Las herramientas incluyen SmartDriver, una plataforma de aprendizaje de eco-conducción desarrollada y mantenida por el Departamento de Recursos Naturales de Canadá en consulta con representantes de la industria carretera (Government of Canada, 2023).

4.1.1 Evitar y reducir la necesidad de viajes motorizados

Incrementar la restricción de circulación de vehículos contaminantes en las ciudades y del transporte privado en zonas de alta congestión dando prioridad a peatones, ciclistas y el transporte público. Avanzar en la integración de la planificación territorial y el desarrollo del transporte público. Brindar incentivos que promuevan el auto compartido, trabajo a distancia y programas de gestión de estacionamiento. Ampliar la infraestructura peatonal y ciclista otorgando incentivos en los centros laborales.

4.1.2 Cambiar a modos de transporte más sustentables

Generar una estrategia de renovación de autobuses y camiones a diésel para que se beneficien de los corredores en donde se distribuye el combustible de ultra bajo contenido de azufre. Es necesaria la reactivación del Fondo Metropolitano como instrumento financiero, para fortalecer estructuras de planeación y gobernanza metropolitanas y la sustentabilidad ambiental de los proyectos. Consolidación del sistema de transporte público en las ciudades que contemplen la electrificación de su flotilla en la primera renovación de unidades.

Impulsar que los gobiernos locales orienten y reasignen el presupuesto hacia proyectos de transporte público y movilidad activa que arrojen los mayores beneficios urbanos, sociales y ambientales en el largo plazo.

4.1.3 Mejorar los combustibles y la tecnología de los vehículos

Dos herramientas de política son fundamentales para mejorar la eficiencia del combustible y mejorar la introducción de tecnologías bajas en carbono son los estándares nacionales sólidos de eficiencia del combustible mediante los cuales los fabricantes de vehículos obligan a reducir las emisiones de GEI y contaminantes del aire de los vehículos. La Iniciativa Global de Economía de Combustible (GFEI) exige un aumento agresivo en los estándares de economía de combustible, incluida una reducción del 90% en las emisiones de CO₂ por kilómetro para 2050.

Y la electrificación del transporte realizada en paralelo a la descarbonización del sector eléctrico. Esto incluye la actualización y publicación de la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica con rutas y metas claras para acelerar el cambio tecnológico a través de incentivos fiscales y financieros (créditos concesionales, garantías, financiamiento mixto, entre otros esquemas) para unidades de transporte público, carga y autos privados. A pesar de que México tiene la infraestructura de carga más grande de América Latina, con más de dos mil centros instalados alrededor del país, entre 2016 y 2019 se registraron solamente 305 vehículos eléctricos, mil 339 híbridos enchufables y 23 mil 964 híbridos convencionales.

4.1.4 Planes nacionales y estrategias

Los planes nacionales y las estrategias de transporte de los países referentes reconocen la importancia del modo carretero para la descarbonización; algunos países ya han establecido objetivos concretos hablando de reducción de emisiones. La autoridad de carreteras de Reino Unido estableció en su plan 2030/2040/2050, el objetivo de alcanzar cero emisiones a 2030 para las emisiones de la autoridad, a 2040 para las operaciones de mantenimiento y construcción y a 2050 para el tráfico que circula por las carreteras (National Highways, 2021). También se está avanzando en el establecimiento de estrategias a nivel subnacional como en el marco de la Ley Bipartidista de Infraestructura, con el que Estados Unidos creó el Programa de Reducción del Carbono para financiar proyectos de reducción de emisiones de CO₂ procedentes del transporte carretero. El Programa requiere que cada Estado elabore una estrategia de reducción del carbono para este modo a más tardar dos años después de su entrada en vigor, y su actualización de estrategia cada cuatro años (FHWA, 2023).

Otra medida importante para avanzar en la descarbonización es la mejora de la integración del transporte carretero con otros modos de transporte,

como el transporte marítimo y ferroviario, así como también la integración entre el transporte de carga de larga distancia y el transporte urbano de carga. Por ejemplo, el Plan de Descarbonización del Transporte del Reino Unido aborda específicamente la descarbonización multimodal y los factores clave (Department for Transport, 2021).

4.1.5 Normativa

Las normas son un instrumento fundamental en el cumplimiento de las metas de descarbonización, ya que proveen los lineamientos para combustibles, vehículos e infraestructura. Los países referentes disponen de una amplia gama de regulaciones que incluyen la mejora de la calidad del combustible, estándares de emisión de los vehículos, y regulación sobre la tarificación de la infraestructura vial, que han permitido avanzar en la reducción de emisiones del sector. La Directiva 2009/30/CE de la UE sobre la calidad de los combustibles estableció una reducción de al menos 6% de la intensidad de GEI al 2020 y luego garantizar que se respete el objetivo, a la par que regula la sostenibilidad de los biocombustibles (ERA, 2023).

El impacto de los GEI de los combustibles se calcula en función del ciclo de vida completo (extracción, transformación y distribución). Las regulaciones sobre estándares y objetivos de producción para los automóviles están presentes en diferentes en todas partes del mundo, como en la UE con el Reglamento 2019/631 y Nueva Zelanda con el documento Clean Car Estándar y el Clean Car Discount, obligatorios desde el 2022.

En la Unión Europea los estándares implementados sobre emisiones de CO₂ para vehículos livianos triplicó al porcentaje de vehículos eléctricos y generó una reducción del 12% en las emisiones promedio de CO₂ por km de vehículos nuevos registrados en 2020, en comparación con las emisiones promedio de los vehículos registrados en 2019 (ERA, 2023). El estado de California en Estados Unidos exige actualmente a los fabricantes de vehículos que un porcentaje de su producción corresponda a vehículos híbridos o de cero emisiones y prohibirá la venta de automóviles a gasolina a partir de 2035. También en ese sentido, la UE aprobó en marzo de 2023 una nueva regulación que prohibirá la venta de vehículos de combustión interna nuevos, exceptuando a los motores que operen con combustibles sintéticos neutros en carbono, a partir de 2035.

4.1.6 Combustibles alternativos

El subsector transporte depende fuertemente de los combustibles fósiles convencionales. La energía que proviene del petróleo y sus derivados

representó en el 2018, el 95.5% de la energía utilizada en el transporte del todo el mundo, y solo el 4.5% restante proviene de biocombustibles y electricidad (SLOCAT, 2021). En el transporte carretero, la solución energética con mayor potencial de reducción de emisiones de GEI son los vehículos eléctricos de batería completa -entre 60% y 70% en comparación con los coches convencionales a lo largo de su vida útil- y los vehículos de pila de hidrógeno (ZEV Transition Council, 2021). Sin embargo, la reducción a cero emisiones de GEI del transporte no puede lograrse única con esta medida energética, sobre todo a corto y medio plazo. Para cada modo de transporte se debe desplegar políticas públicas con medidas favorables para el desarrollo de energías renovables y combustibles alternativos, a fin de alcanzar los objetivos de descarbonización en el sector.

Existen dos categorías principales de combustibles alternativos los biocombustibles, que son obtenidos a partir de biomasa mediante diversos métodos de producción; y los e-combustibles, también conocidos como electrocombustibles, power-to-X (PtX), power-to liquid (PtL) o combustibles sintéticos, que son producidos mediante un proceso industrial que convierte la energía eléctrica en energía química. Los e-combustibles se dividen entre los que contienen carbono como el e-queroseno o SAF y el e-metanol, y los que no como el hidrógeno y el amoníaco.

Los biocombustibles ya se utilizan ampliamente en el transporte carretero y son una opción viable para contribuir a la descarbonización de la aviación y del transporte marítimo. Sin embargo, la escala a la que se aplican está limitada por la cantidad de biomasa que puede cultivarse de forma sostenible. Por tanto, los e-combustibles pueden complementar a los biocombustibles. Presentan menos limitaciones de escalabilidad a largo plazo, pero se encuentran en un nivel de madurez tecnológica inferior al de los biocombustibles (ITF, 2023). La viabilidad de los combustibles alternativos asociados a modo de transporte varía en función de las propiedades químicas, los requisitos de manipulación y almacenamiento, y los costos de producción.

Los biocombustibles representan más del 90% de la energía renovable utilizada en el transporte carretero y pueden reducir hasta la mitad de las emisiones de GEI en comparación con los combustibles fósiles (SLOCAT, 2021). Sin embargo, ya mencionábamos en capítulos anteriores que la producción de estos combustibles depende de la disponibilidad de las materias primas (aceites vegetales, cereales, residuos forestales o agrícolas, etc.) y puede ser retirada de otras aplicaciones, como la bioenergía para calefacción y electricidad, o de la alimentación de la población. Esta competencia de usos puede provocar problemas de

seguridad alimentaria y de disponibilidad de los suelos y agua, sobre todo en los países que aún no cubren del todo estas necesidades. Por otro lado, los biocombustibles son muy sensibles a los factores agroclimáticos (rendimiento de los cultivos, umbrales de emisión relacionados con el cambio de uso del suelo, etc.) y existen dudas sobre la sostenibilidad de algunas materias primas. El impacto global de los biocombustibles en las emisiones de GEI del transporte es escaso porque suelen mezclarse con la gasolina y el gasóleo, lo que también impacta en la calidad del aire. Los biocombustibles celulósicos tienen mayor potencial, pero son insuficientes ante las necesidades de producción. En la aviación, el biojet o SAF es un combustible sostenible certificado, aunque actualmente representa menos del 1% de los combustibles utilizados en el sector (IRENA, 2021).

Sobre los e-combustibles drop-in son combustibles alternativos compatibles con la tecnología y los sistemas de infraestructura existentes. Los combustibles no drop-in pueden utilizarse en las tecnologías existentes con algunas adaptaciones, ya sea en el propio motor, en el sistema de suministro de combustible o en ambos. Más opciones energéticas son viables o potencialmente viables para la descarbonización del sector marítimo y del transporte por carretera, aunque su producción de ve limitada por los costos y todavía es menor a los biocombustibles.

Es importante destacar, que dentro de los desarrollos de electromovilidad se encuentran los de vehículos pesados con batería eléctrica, con celdas eléctricas y las carreteras electrificadas. Asimismo, hay ya varios pilotos de vehículos pesados a hidrógeno. El consenso en los países avanzados es apoyar regulatoria, técnica y financieramente diferentes soluciones de cero emisiones o cero emisiones netas, evitando en este momento de prueba apostar por una única solución

4.1.7 Movilidad eléctrica

En los últimos años la electrificación del transporte ha tomado el rumbo de la transición a vehículos totalmente eléctricos, enchufables o híbridos. Los vehículos de propulsión eléctrica sin sistemas de combustión interna tomaron fuerza en la segunda década del siglo XXI, lo que arrojó desarrollos tecnológicos asociados con diferentes propuestas de alimentación y almacenamiento energético. Estos vehículos funcionan por el uso de catenarias, puntos de carga domiciliaria y electrolineras en vía pública para alimentar, a través de diferentes procesos, que alimentan a las baterías que almacenan la energía eléctrica, que después es entregada a los motores eléctricos conectados al sistema de tracción de los vehículos. En informes recientes los costos nivelados del transporte (LCOT, por sus siglas en inglés - Levelized Cost of Transport) tienden a

reducirse con las tecnologías en diferentes comportamientos de acuerdo con el tipo de vehículo, esto se ha observado en los sistemas de transporte público de Bogotá y Santiago de Chile con la implementación de autobuses eléctricos, en donde el costo total de propiedad (TCO, por sus siglas en inglés - Total Cost of Ownership) de un autobús eléctrico al final del ciclo de vida útil del vehículo es menor que el de un autobús de combustión interna, dado a que este tipo de vehículos tienen menos partes móviles propensas al desgaste y, por ende, la reducción en costos de mantenimiento es significativa (SICT, 2023). Ya hay metas comprometidas para que los vehículos de combustión interna en algunos segmentos en el futuro próximo sean sustituidos por vehículos eléctricos.

Todo vehículo eléctrico tiene componentes fundamentales como la batería y el motor eléctrico; al adoptar la electromovilidad, es importante realizar este análisis de fuentes con las que se está generando la energía eléctrica para poder calcular de manera adecuada los impactos que tiene en la transición hacia este tipo de movilidad.

Los países quienes ya adoptaron vehículos eléctricos en su movilidad trabajan en las adaptaciones para proveer una red de cargadores de acceso público, por ejemplo, en todo el mundo totalizaron 2.2 millones de cargadores a finales de 2022 -de los cuales un tercio eran cargadores rápidos- registrando ese año un crecimiento del 55% en el total de cargadores respecto al stock de 2021 (IEA, 2022). Por otro lado, la infraestructura de recarga de hidrógeno se encuentra comparativamente menos desarrollada que en el caso de la movilidad eléctrica, con cerca de 700 estaciones de repostaje de hidrógeno desplegadas a nivel mundial (IEA, 2022c). El despliegue de una red de infraestructura pública de cargadores eléctricos y estaciones de repostaje resulta fundamental para asegurar la disponibilidad de servicios en los recorridos de larga distancia, que acompañe el crecimiento de la flota vehicular.

4.1.8 Movilidad con Hidrógeno

El hidrógeno también se reconoce como parte de la solución para sustituir los combustibles fósiles en el modo carretero (IPCC, 2018). Se espera que el mercado de camiones de hidrógeno continúe creciendo a nivel mundial impulsado por normativas como la Advanced Clean Truck de California y el Memorando de Entendimiento Mundial sobre Vehículos Pesados y Medianos con Cero Emisiones, al fomentar que los fabricantes de camiones ofrezcan más opciones de cero emisiones (IEA, 2022). El desarrollo de ambos tipos de tecnología -eléctrica e hidrógeno- podría traducirse en beneficios económicos. Un análisis para la Unión Europa muestra que un sistema basado 100% en vehículos eléctricos podría costar entre 3 y 5 billones de euros más para 2050, en comparación a un sistema

combinado, al reducir el riesgo de agotamiento de los recursos y aliviar cuellos de botella que podrían surgir si se considera solamente una opción tecnológica (Clean Hydrogen Partnership, 2022). Ahora bien, esto implicaría el desarrollo de diferentes infraestructuras de abastecimiento y recarga para diferentes fuentes de energía, por lo que se requieren mayores análisis sobre el beneficio neto de estas opciones (ITF, 2022).

4.1.9 Infraestructura

Además de la descarbonización de los vehículos, la descarbonización del modo carretero requiere incluir la construcción, mantenimiento y operación de la infraestructura vial. Las medidas necesarias para lograr este objetivo incluyen cambios en los materiales y procesos constructivos para disminuir la energía requerida, reciclaje de materiales, optimización de rutas para minimizar la energía involucrada en el transporte de materiales y desechos, realización de mantenimiento preventivo a los pavimentos y la generación de energía renovable para suplir la demanda energética asociada a la iluminación y señalización. En este sentido, la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos cuenta con una guía detallada para mejorar la sostenibilidad de pavimentos, la cual resume las mejores prácticas para minimizar el consumo energético y las emisiones asociadas a las diferentes etapas en la vida útil de las carreteras (FHWA, 2015). Un ejemplo sobre los cambios en materiales es el uso de mezclas asfálticas tibias, las cuales han sido ampliamente utilizadas en Estados Unidos, México y Sudáfrica para reducir el consumo energético y las emisiones asociadas a la construcción de infraestructura vial. Los procesos de producción y aplicación de este tipo de mezclas asfálticas se realizan a temperaturas de hasta 40°C menos que en el caso de pavimentos convencionales, reduciendo el consumo energético del proceso de producción, facilitando los procesos constructivos y aumentando la durabilidad (PIARC, 2019).

4.2 Transporte de pasajeros

En 2010, la demanda total de movilidad de pasajeros en México fue cercana a 900 mil millones de kilómetros-pasajero y se estima que esta cifra podría elevarse hasta 1.4 billones en 2050. En la actualidad el 63% de los kilómetros recorridos se cubrieron en automóviles privados y tan sólo el 35% se efectúan en medios masivos de transporte (autobús, metro o avión). La tasa de ocupación promedio de los vehículos es de 1.4 personas por vehículo-kilómetro y la flota es de aproximadamente 24 millones de vehículos (INECC, 2014).

Los escenarios futuros desarrollados consideran que la flota vehicular crece a unos 51 millones de vehículos en 2050 y que esos vehículos tienen

una ocupación promedio de 1.2 personas por vehículo por kilómetro. Esto es el resultado de mantener las tendencias actuales de motorización en el país, con ciertas limitaciones sobre la saturación vehicular en las ciudades mexicanas, y que han sido señaladas por expertos consultados en la materia. Aunque tradicionalmente se modela el tamaño de la flota vehicular como una función del PIB per cápita de los pobladores, este estimado es muy general y no se aplica cabalmente a México. Los expertos consultados sugieren que el aumento en la flota vehicular no simulará los niveles estimados en EUA, donde el nivel de saturación se localiza cerca de 800 vehículos por cada 1000 habitantes, sino que emulará de forma más cercana a lo observado en Europa, donde la tasa de motorización es cercana a los 400 vehículos por cada 1000 habitantes.

4.3 Transporte de carga

Los vehículos pesados de carga representan menos de 10 % de la flota, pero contribuyen hasta con un 40 % de las emisiones GEI globales del sector transporte (Moultak et al., 2017). El sector de carga es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de partículas finas y precursores de ozono.⁸ El material particulado ultrafino (PM_{2.5}) contribuyó a la muerte prematura de 2.9 millones personas a nivel mundial en 2017, así como a enfermedades pulmonares, cardiovasculares e infecciones respiratorias, entre otras. Los camiones con tecnologías de cero y bajas emisiones logran reducir las emisiones de carbono hasta en un 63% en comparación con las tecnologías diésel durante toda la vida útil del vehículo.

Con respecto al transporte ferroviario, enfrenta el desafío de reducir su huella ambiental en un mundo cada vez más comprometido con la sostenibilidad ya que se considera un pilar fundamental en la movilidad de mercancías a larga distancia. La electrificación de los ferrocarriles, definida como su transición de una propulsión con generadores y motores diésel a una tracción totalmente eléctrica, desempeña un papel crucial para reducir la dependencia del sector del transporte de los combustibles fósiles.

Según la Agencia Internacional de la Energía, los ferrocarriles electrificados se encuentran entre los modos de transporte más eficientes desde el punto de vista energético y respetuosos con el medio ambiente, con un consumo de energía por pasajero-kilómetro inferior al del transporte por carretera o aéreo. En las próximas décadas se prevén importantes inversiones en infraestructura y vehículos ferroviarios, con objeto de hacer este medio de transporte más atractivo a los viajeros, potenciándolo frente a los vuelos de corta distancia. La ampliación de las redes ferroviarias, y su uso eficiente, será importante para lograr la reducción de emisiones necesaria para alcanzar el escenario Net Zero.

Como cambio modal el transporte ferroviario ofrece intensidad de las emisiones del transporte ferroviario de mercancías es casi diez veces menor a la de los camiones (ITF, 2022b). El Ministerio de Economía de Alemania ha estimado que un cambio parcial del transporte carretero de pasajeros y de carga al sistema ferroviario podría reducir las emisiones en 18 millones de toneladas CO₂ (Donat, 2020). Para incentivar esta transición, el gobierno alemán ha puesto en marcha un plan maestro para el transporte ferroviario de mercancías, cuyos ejes principales son garantizar una infraestructura de alta capacidad, hacer un uso extensivo del potencial de innovación y mejorar el marco de la política de transporte (BMVI, 2017). En el caso de la UE, se estima que el cambio del transporte carretero al ferroviario para distancias superiores a 700 km -aumentando la partición modal del ferrocarril para el transporte de mercancías hasta el 36%- podría ahorrar 40 MtCO₂ al año (ERA, 2023). Por esta razón, el cambio al ferrocarril es uno de los principales pilares de la estrategia de la UE para alcanzar los objetivos del “Pacto Verde Europeo en Transporte”, identificando la necesidad de conectar las principales zonas urbanas de Europa; conectar los 30 principales aeropuertos a la red ferroviaria; desarrollar una red europea de trenes nocturnos; eliminar los cuellos de botella ferroviarios; fomentar una política ferroviaria industrial; y financiar proyectos ferroviarios (ERA, 2020).

4.4 El reto nacional

México se encuentra entre los primeros 10 lugares mundiales en cuanto a emisiones de GEI en el sector transporte. En el país, el transporte es responsable de la emisión de 148 millones de toneladas de CO₂ y representa la segunda fuente de emisiones GEI después de la generación de electricidad. El autotransporte, constituido principalmente por autos privados, contribuyen con el 80% de las emisiones y es la principal causa del incremento en la demanda de energía. La flota, además, va en aumento, entre 1990 y 2017 el parque vehicular aumentó a una tasa 3.5 veces mayor que la población.

Actualmente, México está implementando el Programa de Financiamiento al Transporte Sostenible con el objetivo de reducir emisiones, facilitando créditos al sector de micro, pequeñas y medianas empresas (MIPyME) para la renovación del parque vehicular del transporte de carga y del transporte urbano de pasajeros. El objetivo de este programa es el de promover la renovación del parque vehicular a través de créditos a MiPyME del sector de transporte urbano de pasajeros y transporte de carga, incluyendo la chatarrización de vehículos obsoletos, a fin de apoyar la reducción de emisiones de GEI y otros contaminantes; con esta medida se espera reducir 75,300 tCO₂e/anuales y mejorar las

condiciones de seguridad vial de las ciudades y de las condiciones de transporte.

México se unió al Compromiso Mundial sobre energías renovables y eficiencia energética, que busca triplicar la capacidad de generación de energía renovable a nivel global, hasta al menos 11,000 GW de aquí a 2030. Vale destacar, que, como parte de las acciones de adaptación, México ha desarrollado instrumentos sobre la vulnerabilidad funcional de las redes de transporte en el país, como lo es la vulnerabilidad estructural de los diferentes eslabones de la red carretera y ferroviaria (Gradilla, 2024).

Otro asertivo nacional, es el programa Transporte Limpio, impulsado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el cual es una iniciativa de reducción de consumo de combustible donde las empresas de transporte y empresas generadoras de carga pueden incorporarse de manera voluntaria para comprometerse a implementar medidas de ahorro de combustible, incluyendo prácticas de eco-conducción, y beneficiarse de ahorros en combustible, conocimiento del impacto ambiental de sus operaciones y mejoras de imagen con compromiso con el medio ambiente. El programa cuenta con 718 empresas adheridas y en 2021 evitó la emisión de 2.7 MtCO₂ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022). Adicionalmente, la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) ofrece cursos de eco-conducción que son opcionales para flotas privadas y obligatorios para conductores que manejan vehículos de flotas de agencias gubernamentales. Cerca de 40.000 vehículos que son manejados por agencias gubernamentales deben cumplir con este requisito (Pineda & Xie, 2021).

Conclusiones y recomendaciones

La descarbonización en el transporte tiene que integrar a diversos factores que están estrechamente relacionados, como es el desarrollo de tecnologías, economía, empresas, así como la implementación de políticas públicas, la promoción de cambios en las conductas por la sociedad civil, no solo nacionalmente sino también de manera multilateral, ya que solo en conjunto global se podrán tener reducciones significativas del dióxido de carbono para detener los cambios climáticos y reducir sus impactos. México tiene un gran potencial en el sector transporte y energético que son donde mayor impacto podrían tener. Ciertamente, medidas de corto o mediano plazo en, por ejemplo, la electrificación del transporte, conllevan a una ambiciosa transformación energética, sin embargo, si esta se da a la par a la migración de combustibles alternativos no fósiles, la transición se ve beneficiada.

En este sentido, como parte del trabajo realizado podemos destacar la metodología general que se plantea para establecer las rutas de descarbonización, la cual es primeramente la regulación y establecimiento de normativa enfocada a la reducción de emisiones en los sectores y subsectores clave, en donde se pueden alinear las políticas públicas. A continuación, se concluye para cada modo de transporte analizado y se emiten recomendaciones de las líneas de acción en base a la situación actual.

Del análisis que se realizó para cada modo de transporte en el país, del transporte aéreo se detectó que tiene una gran área de oportunidad sobre todo en la implementación de combustibles no fósiles (o biocombustibles) y la promoción para el desarrollo de tecnologías de aeronaves que, de acuerdo a la tendencia internacional, puede tener grandes beneficios con sustituciones de materiales más ligeros para el ahorro de la quema de combustible fósil, igualmente, se han probado mejoras con el uso de combinaciones de combustibles fósiles con biocombustibles, y con la implementación de aeronaves más pequeñas cuando las rutas son aptas. El avance en el desarrollo tecnológico de aeronaves en algunos casos ha hecho redituable la renovación de porcentajes importantes de la flota de las aerolíneas. Destaca el potencial de los mecanismos económicos que ya han implementado en la aviación en México avalado por la incorporación y adopción del esquema CORSIA. Estos mecanismos fortalecen la reducción de emisiones globales para el país, algo que puramente no

podría concretarse con solo el cambio energético y tecnológico. Las unidades de emisión son la opción para cumplir con la neutralidad de carbono cuando aún no se tienen implementadas estrategias de mitigación o no son rentables. En este sentido, las aerolíneas mexicanas que realicen vuelos al extranjero deberán prepararse para cumplir por las regulaciones de CORSIA desde la fase piloto (2021-2023) y tendrán que compensarlas con estas unidades económicas de compensación, para la ya establecida, línea base con las emisiones del año 2020, como ya se analizó en el capítulo 2.

Cabe destacar que dentro de la operación de los aeropuertos también se han adoptado medidas de mitigación, como lo son la certificación con sistema de manejo de huella de carbono, obteniendo a través de prácticas sustentables (ahorro de consumo de energía eléctrica en zonas de espera de pasajeros y comerciales, mejoras de maniobras dentro de los aeropuertos, manejo de residuos sólidos urbanos, entre otros); esta implementación de sistemas con cálculo de huella de carbono debe de ser una práctica por normativa en todos los aeropuertos nacionales, ya que ha demostrado contribuir a la reducción de las emisiones en el subsector.

En el transporte aéreo las líneas de acción para lograr las reducciones de CO₂ en este sector, son cuatro pilares basados en mejoras tecnológicas de las aeronaves, mejoras operativas en la organización del transporte aéreo, el uso de combustibles sostenibles y la compensación de emisiones.

En el caso del transporte marítimo, ya la OMI fijó la meta estratégica de neutralidad para el 2050 con línea de año base el 2008, el mayor impacto de reducción de emisiones GEI provendrá de la transición hacia combustibles limpios o emisiones cero de carbono, donde se perfila sean las acciones clave, tanto dentro como fuera de los puertos. Lo importante en este subsector es que México cuenta con importantes puertos y atractivos comercialmente, y la extensión de sus litorales hace que cuente con condiciones oceanográficas propicias para el aprovechamiento de energía renovable por medio de corrientes marinas y variedad de rangos de marea. Si México, adopta tecnologías de propulsión de carbono cero en sus puertos de México, la atracción de inversiones se vería importantemente incrementada; aquí una política pública sobre generación de energía en los puertos sería completamente viable en coordinación con las autoridades portuarias, transportistas y navieras sería clave, así como, la generación de datos, inventarios e información pública, accesible y actualizada periódicamente.

En este subsector, los mecanismos de precios para promover la eficiencia energética son a través de la reducción de tasas portuarias a los buques que tengan menor impacto ambiental; la implementación de estos

mecanismos en puertos nacionales no requeriría más que de la aplicación de la política para que por parte los barcos que ingresen tengan un certificado con índice validado para acceder al beneficio, incluso para obtener prioridad de maniobras en el puerto (como incentivo no económico). Otro instrumento potencial para implementar como política en los puertos, dado al importante crecimiento en infraestructura portuario, es la incorporación de requerimientos medio ambientales en las licitaciones de obras y servicios portuarios. A través de estos, se pueden exigir uso de sistemas de gestión ambiental, monitoreos e instalación de prácticas para el uso de energía renovable y reducción de emisiones.

La tendencia internacional con respecto a la transición de combustibles es con hidrógeno y amoníaco, por lo que, las regulaciones tienen el doble propósito de impulsar la transición energética y resguardar por la seguridad; es importante que al elaborar políticas al respecto del desarrollo de nuevas embarcaciones e infraestructura y de nuevas fuentes de energía, se expidan los estándares de seguridad para su producción, gestión y disposición. Al todavía no contar con un marco político y financiero en este sentido, se tiene la ventaja de poder crear uno enriquecido con las recomendaciones y aspectos relevantes a contener.

El subsector de transporte terrestre tiene el mayor reto a cumplir con respecto a las metas globales de descarbonización global, ya que estas se vuelven más ambiciosas, aumentando la presión para que las acciones para la reducción de gases de GEI y CO₂ se dé para los años que se han ratificado y aumentado los compromisos. Efectivamente, de materializarse, estas promesas podrían marcar una gran diferencia para evitar los efectos más severos del cambio climático. Sin embargo, en muchos casos no existe claridad sobre cómo se logrará cumplir con este compromiso. Es necesario plasmado las metas concretas de descarbonización y en la legislación para que, al cumplirse, sean de observancia obligatoria para su sostenibilidad con respecto al tiempo.

Respecto a la legislación y normativa, el país cuenta con la Ley General de Cambio Climático, la Ley de la Industria Eléctrica y la Ley de Transición Energética, en las que se inserta la Estrategia Nacional de Cambio Climático y el cumplimiento de las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional como objetivos a cumplir en el plan de reducciones de GEI como país. El Programa Especial de Cambio Climático (PECC) se formó para abonar y atender el cumplimiento de las NDCs, sin embargo, no plantean metas. Las medidas dentro de las NDCs son evitar el fomento del trabajo remoto para reducir la necesidad de movilidad; cambiar la expansión y llevar a cabo la rehabilitación de la red del subsector ferroviario; y la de mejorar la electromovilidad, propulsar el desarrollo de vehículos más

eficientes y la implementación de programas de transporte limpio. Se destaca y se reconocen las medidas que el país está llevando en aspectos como la infraestructura para el sector transporte y las adaptaciones planificadas dirigidas al cambio climático (CICC, 2021).

Una de las medidas más viable a corto plazo en este subsector es la inserción de transporte eléctrico. Aunque el país ya cuenta con sistemas de movilidad electrificados, esta medida va más a migrar el parque vehicular de vehículos ligeros y pesados. Al respecto, ya hay metas comprometidas en los tratados y acuerdo a los que el país se ha adjuntado como país Parte. Sin embargo, este cambio de tiene que darse a la par con la migración generar energía eléctrica basada en fuentes renovables para tener un desarrollo sostenible del sector. Es prioritario adoptar políticas públicas escalonadas para la transición de vehículos y de fuentes de energía para poder cumplimiento a lo que se aproxima antes de concluir la siguiente década. Hay mucho por hacer en el país, sin embargo, la implementación de acciones globales apunta a que la descarbonización sea posible, teniendo voluntad de sociedad, gobierno e instituciones para generar los cambios que se requieren para el impacto global, a corto, mediano y largo plazo.

Bibliografía

- Asociación Mundial de la Carretera [PIARC]. (2019). *Adaptation Methodologies and Strategies to Increase the Resilience of Roads to Climate Change*. [Consulta en línea]. <https://www.piarc.org/en/order-library/31335-en-Adaptation%20Methodologies%20and%20Strategies%20to%20Increase%20the%20Resilience%20of%20Roads%20to%20Climate%20Change%20%E2%80%93%20Case%20Study%20Approach>
- Bastlan, E. (2020). *How green is your airline? The sustainability debate*. OAG Aviation Worldwide Limited. [Consulta en línea]. <https://www.oag.com/how-green-is-your-airline>
- Becken, S. y Pant, P. (2019). *Iniciativas de las aerolíneas para reducir el impacto climático*. Amadeus. [Archivo PDF]. <https://amadeus.com/documents/es/pdfs/iniciativas-de-las-aerolineas-para-reducir-el-impacto-climatico.pdf>
- Calatayud, A., Rivas, M., Camacho, J., Beltrán, C., Ansaldo, M. y Café, E. (2023). *Transporte 2050: el camino hacia la descarbonización y la resiliencia climática en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo. [Archivo PDF]. <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Transporte-2050-el-camino-hacia-la-descarbonizacion-y-la-resiliencia-climatica-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Cámara de Diputados. (2016). *Ley General de Cambio Climático*. Diario Oficial de la Federación. [Consulta en línea]. [LGCC.pdf \(diputados.gob.mx\)](https://www.diputados.gob.mx/LGCC.pdf)
- Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation [CORSIA]. (2022). *Frequently Asked Questions (FAQs)*. [Archivo PDF]. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_Dec2022.pdf
- Clean Hydrogen Partnership. (2022). *The Road to Net Zero. Study on the strategic development of battery-electric vehicles and fuel cell-electric vehicles infrastructure*. [Archivo PDF]. <https://www.clean->

hydrogen.europa.eu/system/files/2022-09/CleanHydrogenPartnership_Report_vf.pdf

Climate Watch. (2023). *GHG México 1990-2020*. [Consulta en línea]. https://www.climatewatchdata.org/countries/MEX?end_year=2020&art_year=1990

Comisión Intersecretarial de Cambio Climático [CICC]. (2021). *Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024*. Diario Oficial de la Federación. [Consulta en línea]. https://dof.gob.mx/2021/SEMARNAT/SEMARNAT_081121_EV.pdf

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC]. (2023). *¿Qué es el Protocolo de Kyoto?*. [Consulta en línea] https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

Decision 4/CMA.1 (2018). *Further guidance in relation to the mitigation section of decision 1/CP.21*. [Archivo PDF]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4-CMA.1_English.pdf

Department for Transport. (2021). *Decarbonising Transport. A Better, Greener Britain*. [Consulta en línea]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1009448/decarbonising-transport-a-better-greener-britain.pdf

Donat, L. (2020). *Decarbonising transport in Germany: Policy options to support a shift to rail*. Germanwatch. [Consulta en línea]. <https://www.climate-transparency.org/media/decarbonising-transport-in-germany-policy-options-to-support-a-shift-to-rail>

European Union Agency for Railways [ERA]. (2020). *Fostering the railway sector through the European Green Deal*. [Consulta e línea]. https://www.era.europa.eu/system/files/2022-10/fostering_railway_sector_through_european_green_deal_en.pdf

European Union Agency for Railways [ERA]. (2023). *Getting Rail Freight on the Right Track*. [Consulta e línea]. [Getting Rail Freight on the Right Track | European Union Agency for Railways \(europa.eu\)](https://www.era.europa.eu/GettingRailFreightontheRightTrack)

Fahey, D., Baughcum, S., Fuglestedt, J., Gupta, M., Lee, D., Sausen, R. y Van Velthoven, P. (2016). *White paper on climate change aviation impacts on climate: state of the science*. ICAO. [ENVReport2016_pg99-107.pdf \(icao.int\)](https://www.icao.int/ENVReport2016_pg99-107.pdf)

- Federal Highway Administration [FHWA]. (2023). *Fact Sheets – Carbon Reduction Program (CRP)*. [Consulta en línea]. https://www.fhwa.dot.gov/bipartisan-infrastructure-law/crp_fact_sheet.cfm
- Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology [BMK]. (2021). *Guidelines for National Eco-driving Initiatives. The PEP Partnership on Eco-driving*. [Archivo PDF]. https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:a651940e-946a-4d04-9ce5-bc3d4d548cc7/KAM_Brosch%C3%BCre_Guidelines_Ecodriving_A4_BARR_220323.pdf
- Federal Ministry of Transport and Digital Infraestructure [BMV]. (2017). *Rail Freight Masterplan*. [Consulta en línea]. bmdv.bund.de/SharedDocs/EN/publications/rail-freight-masterplan.pdf?__blob=publicationFile
- Global Maritime Forum. (2022). *Shipping's Energy Transition: Strategic Opportunities in Mexico*. [Consulta en línea]. https://cms.globalmaritimeforum.org/wp-content/uploads/2022/07/Shippings-energy-transition_Strategic-opportunities-in-Mexico.pdf
- Government of Canada. (2023). *Incentives for Medium- and Heavy-Duty Zero-Emission Vehicles Program (iMHZEV)*. [Consulta en línea]. <https://tc.canada.ca/en/road-transportation/innovative-technologies/zero-emission-vehicles/medium-heavy-duty-zero-emission-vehicles>
- Gradilla, L., Mendoza, J. y Aburto, J. (2024). *Consideraciones para la adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático*. [Publicación técnica No. 784]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt784.pdf>
- Hernández, M., Cruz-Acevedo, M., Fabela, J., Hernández, J., Flores, O. y Vázquez, D. (2023). *Diagnóstico del desarrollo tecnológico en México para la incorporación de la electromovilidad en el autotransporte*. [Publicación técnica No. 729]. Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt729.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [INECC]. (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones*

Unidas para el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [INECC]. (2014). *Modelación de descarbonización profunda del sistema energético en México al 2050*. [Archivo pdf] https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110133/CGCCDBC_2014_mod_descarbonizacion_profunda_sist_energetico.pdf

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [INECC]. (2015). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2013*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. [INECC]. (2023). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2020-2021*. [Consulta en línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/853373/10-2023_INEGyCEI_2020_2021.xlsx

International Energy Agency [IEA]. (2022). *Dataset: GHG Emissions from fuel combustion (summary)*. [Consulta en línea]. https://stats.oecd.org/BrandedView.aspx?oecd_bv_id=CO2-data-en&doi=445ec5dd-en#

International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2021). *Reaching zero with renewables: Biojet fuels*. [Consulta en línea] [IRENA_Reaching_Zero_Biojet_Fuels_2021.pdf](https://www.irena.org/publications/2021/04/Reaching-zero-with-renewables-biojet-fuels)

International Transport Forum [ITF]. (2022). *Modal shift to cleaner transport fails to materialize*. [Consulta en línea]. [Modal shift to cleaner transport fails to materialise | ITF \(itf-oecd.org\)](https://www.itf-oecd.org/modal-shift-to-cleaner-transport-fails-to-materialise)

International Transport Forum [ITF]. (2023). *Modal shift to cleaner transport fails to materialize*. [Consulta en línea]. <https://www.itf-oecd.org/modal-shift-transport-trends>

Lara, M. y Li, J. (2024). *México Emisiones y fuentes de los Gases de Efecto Invernadero*. BBVA Research. [Consulta en línea]. [2024-Emisiones-y-fuentes-GEI-Mexico.pdf](https://www.bbva.com/en/publications/articles/mexico-emissions-and-sources-of-greenhouse-gases/)

Mateu, J. (2022). *La hoja de ruta para la descarbonización del transporte aéreo*. Universitat Politècnica de Valencia. [Consulta en línea]. [Mateu - La hoja de ruta para la descarbonizacion del transporte aereo.pdf](https://www.upv.es/transporte/la- hoja-de-ruta-para-la-descarbonizacion-del-transporte-aereo.pdf)

- Medimorec, N., Cardama, M y Krapp, A. [SLOCAT]. (2022). *Climate Strategies for Transport: An Analysis of Nationally Determined Contributions and Long-Term Strategies*. [Archivo pdf]. [Climate-Strategies-for-Transport-An-Analysis-of-NDCs-and-LTS-SLOCAT-December-2021.pdf](#)
- Ministère de l'Économie et F. et de la S. industrielle et numérique. (2023). *Achat d'un véhicule: comment fonctionne le bonus écologique?*. [Consulta en línea]. <https://www.service-public.fr/particuliers/actualites/A16766#:~:text=%C3%80%20partir%20du%2010%20octobre,de%20la%20fabrication%20du%20v%C3%A9hicule>.
- Ministry of Transport. (2021). *Electric Vehicles Programme. Road user charges exemption for light electric vehicles extended until 31 March 2024*. [Consulta en línea]. <https://www.transport.govt.nz/area-of-interest/environment-and-climate-change/electric-vehicles-programme/>
- Moultak, M., Lutsey, N. y Hall, D. (2017). *Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles*. [Consulta en Línea]. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf
- National Highways. (2021). *Net zero highways: our 2030 / 2040 / 2050 plan*. [Consulta en línea]. <https://national-highways.co.uk/media/eispcjem/net-zero-highways-our-2030-2040-2050-plan.pdf>
- Parlamento Europeo [UE]. (2021). *Cambio climático: gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global*. [Consulta en línea]. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230316STO77629/cambio-climatico-gases-de-efecto-invernadero-que-causan-el-calentamiento-global#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20causan%20los%20gases%20de,provocando%20as%C3%AD%20el%20calentamiento%20global>.
- Pineda, L., y Xie, Y. (2021). *Programas de eco-conducción (eco-driving) de camiones. Estado actual en América Latina y mejores prácticas internacionales*. [Archivo pdf]. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/eco-driving-latam-ESP-jun2021.pdf>

- Ricardo y Environmental Defense Fund [P4G] (2021). *Mexico: fuelling the future of shipping*. [Consulta en línea]. p4g-getting-to-zero-coalition-mexico-report.pdf (ucl.ac.uk)
- Sánchez, L., Fabela, J., Hernández, J., Flores, O., Vázquez, D. y Cruz, M. (2020). *Estado del arte de la movilidad eléctrica en México*. [Publicación técnica No. 729]. Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo pdf]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt596.pdf>
- Schroten, A. y Scholten, P. (2019). *Transport taxes and charges in Europe – An overview of economic internalization measures applied in Europe*. [Consulta en línea]. <https://cedelft.eu/publications/transport-taxes-and-charges-in-europe-an-overview-of-economic-internalisation-measures-applied-in-europe/>
- Schroten, A., Király, J., & Scholten, J. (2022). *Pricing instruments on transport emissions*. European Parliament. Policy Department for Structural and Cohesion Policies. Bruselas. [Archivo pdf]. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/699641/IPOLE_STU\(2022\)699641_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/699641/IPOLE_STU(2022)699641_EN.pdf)
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT]. (2023). *Lineamientos para el mapa de ruta tecnológica del Transporte Terrestre en México. Visión 2021 – 2050*. [Consulta en línea]. [pts-016-02-mapa-de-ruta-resumen-alta.pdf](https://www.gob.mx/pts-016-02-mapa-de-ruta-resumen-alta) (www.gob.mx)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2022). *Contribución Determinada a Nivel Nacional. Actualización 2022*. [Consulta en línea]. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf
- Wright Electric. (2021). *Wright Spirit Energy Storage Discussion Paper*. [Consulta en línea]. <https://www.weflywright.com/>
- ZEV Transition Council. (2021). *Decarbonizing road transport by 2050: Zero-emission path- ways for passenger vehicles*. [Consulta en línea]. <https://theicct.org/publication/decarbonizing-road-transport-by-2050-zero-emission-pathways-for-passenger-vehicles/>



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>