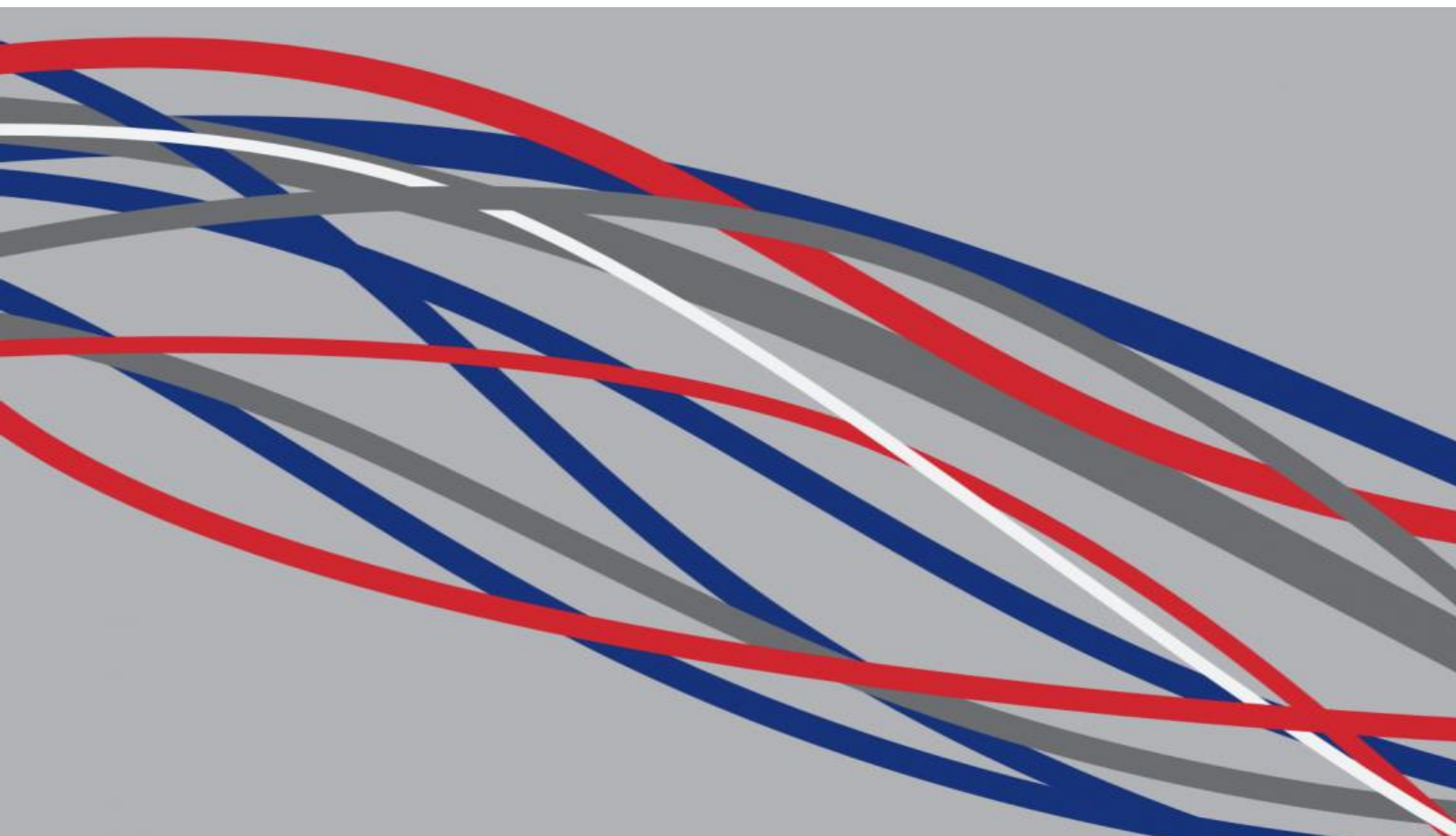


# RUTAS SECTORIALES DE DESCARBONIZACIÓN PARA MÉXICO AL 2030 Y PROYECCIONES A 2050:

DOCUMENTO DE POLÍTICA



# Agradecimiento

ICM, Carbon Trust y WRI agradecen al Gobierno del Reino Unido y a la Embajada Británica en México el apoyo y colaboración brindados para la elaboración de este documento, el cual se realizó bajo el marco del programa UK PACT (Partnering for Accelerated Climate Transitions), como parte del proyecto *2030 Planes Sectoriales de Descarbonización*. Las opiniones expresadas en este documento corresponden exclusivamente a los autores y no representan necesariamente la opinión del gobierno del Reino Unido. La reproducción parcial o total de este documento está autorizada siempre y cuando sea sin fines de lucro y esté referenciada adecuadamente.

Embajada Británica en México  
2030 Sectoral Decarbonization Plans  
Ciudad de México | Julio 1º, 2020

## **Autores:**

Nain Martínez  
Luisa Sierra  
Marco Jano Ito  
Fernando Olea  
Avelina Ruiz  
Fernando Ramones  
Rodrigo Palacios  
Ricardo Cruz  
Iván Islas  
Andrés Flores  
Jorge Villarreal

Embajada Británica en México  
Río Lerma, No. 71,  
Col. Cuauhtémoc, CP. 06500  
México City, México  
T +52 (55) 1670 3200  
E [ukinmexico@fco.gov.uk](mailto:ukinmexico@fco.gov.uk)  
W <https://www.gov.uk/government/news/prosperity-fund-programme-in-mexico>

# Contenido

<b>Mensajes clave</b>	<b>3</b>
<b>Resumen ejecutivo</b>	<b>5</b>
<b>Introducción</b>	<b>9</b>
<b>La trayectoria de emisiones de GEI de México hacia el 2050</b>	<b>9</b>
<b>Ruta de descarbonización del sector eléctrico</b>	<b>13</b>
<b>Ruta de descarbonización del sector petróleo y gas</b>	<b>21</b>
<b>Ruta de descarbonización del sector transporte</b>	<b>27</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>35</b>
<b>Referencias</b>	<b>38</b>

# Mensajes clave

1. Es necesario fortalecer la política nacional y subnacional de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), para que México contribuya a los esfuerzos multilaterales con una reducción acorde con el objetivo de limitar el calentamiento global a un máximo de 2°C , e idealmente no mayor a 1.5 °C, con respecto a la era pre-industrial. Las emisiones de GEI del país continúan creciendo, a un ritmo muy superior al necesario para cumplir con los objetivos de largo plazo establecidos en el Artículo 2 del Acuerdo de París y reflejados en la Ley General de Cambio Climático, los cuales no se lograrán a menos que las emisiones globales caigan a la mitad para 2030 y a cero (neto) para 2050.
2. Para revertir esta tendencia, es clave contar con rutas de descarbonización al 2030 y 2050 para los sectores que más contribuyen a las emisiones de GEI en México: electricidad; petróleo y gas, y transporte . En conjunto, estos sectores aportan 51% de las emisiones nacionales. No obstante, en estos sectores se pueden implementar medidas técnica y económicamente viables que, con una planeación adecuada, lograrían reducir sustancialmente sus emisiones, incluso con cobeneficios ambientales y sociales a nivel local tales como la reducción en la contaminación del aire y en la prevalencia de enfermedades respiratorias asociadas.
3. Para el sector eléctrico, la ruta de descarbonización propuesta lograría reducir sus emisiones a 64 MtCO<sub>2e</sub> para el 2030, lo cual se alinea al escenario de referencia de 1.5°C. Para estabilizar las emisiones en ese nivel, esta ruta requeriría: *i*) duplicar la participación de las energías renovables en 2030 con respecto al escenario de desarrollo tendencial del sector; *ii*) retirarlas centrales basadas en combustibles fósiles con mayor intensidad de emisiones de GEI (las de carbón y combustóleo); *iii*) reducir la participación de otras tecnologías basadas en combustibles fósiles, tales como las de ciclo combinado a gas natural, y *iv*) crear un marco regulatorio y mecanismos de financiamiento que incentiven el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento y la generación distribuida, mismas que son estratégicas en el mediano plazo, ya que pueden incrementar la flexibilidad de la red y disminuir la inversión en infraestructura de transmisión y distribución. La ruta de descarbonización propuesta requeriría una capacidad instalada de generación total 11% superior a la del escenario tendencial para el 2030, en donde las energías renovables alcanzarían una generación de 277 TWh (el 53.7% de la demanda). Aunque la ruta de descarbonización para el periodo 2019-2030 superaría en 5% los costos totales del escenario de desarrollo tendencial, la diferencia entre los costos de ambos escenarios se revertiría al considerar las externalidades ambientales y sociales positivas derivadas de la descarbonización.

4. Para el sector industria de petróleo y gas se propone una ruta de descarbonización con un potencial de reducción de emisiones de 25,3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e al 2030. De este potencial, 57% se lograría con medidas de mitigación económicamente rentables (p.ej., reducción de fugas de metano en las actividades de procesamiento de gas; eficiencia energética en los procesos de refinación de petróleo; y cogeneración). Este porcentaje podría incrementarse a 83% a través de mecanismos internacionales de financiamiento. Para el periodo 2030-2050, el agotamiento natural de los recursos petrolíferos convencionales podría ayudar a reducir las emisiones del sector. Sin embargo, los resultados de los distintos escenarios de desarrollo sectorial (con o sin la explotación de recursos no convencionales), muestran que sería necesario mantener los recursos no convencionales sin quemar para alcanzar los objetivos de mitigación de mediano y largo plazo.
  
5. En el caso del sector transporte, la ruta de descarbonización planteada tiene un potencial de mitigación de 210 MtCO<sub>2</sub>e anuales para el 2030, y hasta 309 MtCO<sub>2</sub>e para el 2050. Este potencial de mitigación se lograría si se dan las siguientes condiciones: *i)* desarrollar una estrategia de movilidad orientada a evitar los viajes de pasajeros y carga; *ii)* desplazar los viajes a modos de transporte sostenible, y *iii)* mejorar la eficiencia energética mediante la transición a combustibles más limpios. Estas medidas darían como resultado que, para 2030 y 2050, la flota vehicular se redujera en 8% y 40% con respecto al escenario tendencial, y la penetración de vehículos eléctricos e híbridos alcanzara el 23% y 91% del total, respectivamente para cada uno de los años indicados. Con las medidas propuestas, se lograría también incrementar la eficiencia energética entre 10 y 15% en modos no carreteros, y en más del doble en modos carreteros. Todo ello se traduce en una demanda energética del sector menor al 66% y un abatimiento de emisiones GEI del 80% para 2050, ambos respecto al escenario de referencia. Las medidas analizadas ajustan las emisiones del sector al escenario de 2 ° C, pero superarían el volumen de emisiones requerido para el escenario de 1.5° C. Estos resultados revelan la importancia de iniciar un proceso de descarbonización en el sector transporte, lo cual fortalecería las condiciones regulatorias e institucionales que permitan plantear una mitigación más ambiciosa en el mediano plazo.

# Resumen ejecutivo

La comunidad científica ha alcanzado un consenso sobre los amplios riesgos climáticos que causaría sobre sistemas sociales y ambientales un calentamiento global superior a 1.5 °C por encima de las temperaturas preindustriales. Estos impactos adversos se expresarán con mayor intensidad sobre las regiones y comunidades en condiciones de desventaja social. Después de más de 20 años de un intenso -y por momentos fallido -proceso de negociación y construcción política, la comunidad internacional alcanzó en el Acuerdo de París (2015) el compromiso de no exceder en 2 °C el aumento en la temperatura global promedio a finales de este siglo con respecto a los niveles preindustriales. También, a fortalecer los esfuerzos políticos a fin de limitar este fenómeno a 1.5 °C.

La arquitectura de “abajo hacia arriba” que caracterizó la construcción del Acuerdo de París, implica que las metas de mitigación climática dependan de las políticas y acciones que los gobiernos nacionales y subnacionales implementen. La definición de las trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que deberían de seguir países, regiones y sectores, es un trabajo técnico útil en el diseño de políticas climáticas debido a que ofrecen escenarios de referencia del comportamiento de las emisiones GEI por sector. En este reporte evaluamos las rutas de descarbonización que deberían seguir los sectores eléctricos, de petróleo, gas y transporte hacia el 2050 a partir de un modelo de presupuesto de carbono para México alineado a un escenario de calentamiento global de 1.5 °C y 2°C. Partiendo de modelos que vinculan la cantidad de CO<sub>2</sub>e acumulada en la atmósfera y su impacto en el aumento de la temperatura global, el presupuesto de carbono permite definir un límite máximo de GEI consistente con un escenario de calentamiento global y sirve como un indicador de referencia para el diseño de política pública en materia de cambio climático.

Partiendo de modelos que vinculan la cantidad de CO<sub>2</sub>e acumulada en la atmósfera y su impacto en el aumento de la temperatura global, el presupuesto de carbono permite definir un límite máximo de emisiones de GEI consistente con un escenario de calentamiento global y sirve como un indicador de referencia para el diseño de política pública en materia de cambio climático. La metodología desarrollada por este estudio estima un presupuesto de carbono para México de 22.2 GtCO<sub>2</sub>e y de 8.89 GtCO<sub>2</sub>e para los escenarios de 2°C y 1.5°C respectivamente, en el periodo 2019-2100 (GIZ e ICM, 2019). En una trayectoria a nivel país alineada a 2°C se estima un volumen de emisiones de GEI de 0.561 GtCO<sub>2</sub>e para el 2030 y 0.356 para el 2050. Para el escenario de 1.5°C, las emisiones nacionales tendrían que alcanzar un volumen de 0.45 GtCO<sub>2</sub>e para el 2030 y 0.147 para el 2050.

En México, los sectores de generación de electricidad, la industria de petróleo y gas y el transporte son estratégicos para la mitigación de GEI debido a su contribución al volumen nacional de emisiones (51% del total de emisiones nacionales). También, el abatimiento de emisiones en estos sectores a través de medidas costo-efectivas tiene un gran impacto en la

generación de bienestar social, y en el acceso y desarrollo de tecnologías. El sector eléctrico tiene un presupuesto de carbono estimado en 4.0 GtCO<sub>2e</sub> en el escenario de 2°C y 1.6 GtCO<sub>2e</sub> para 1.5°C. Este sector tendría que alcanzar un volumen de emisiones de 0.084 GtCO<sub>2</sub> para el 2030 y 0.027GtCO<sub>2</sub> para el 2050 para el escenario de 1.5°C. El sector de la industria de petróleo y gas tiene un presupuesto de carbono estimado en 2.2 GtCO<sub>2e</sub> en el escenario de 2°C y 0.9 GtCO<sub>2e</sub> para 1.5°C, lo cual se traduciría en un nivel de emisiones de entre 0.044 GtCO<sub>2e</sub> para el 2030 y 0.014 GtCO<sub>2e</sub> para el 2050. El sector del transporte tiene un presupuesto de carbono estimado en 4.8 GtCO<sub>2e</sub> en el escenario de 2°C y 1.9 GtCO<sub>2e</sub> para 1.5°C. Las emisiones del sector transporte tendrían que alcanzar 0.097 para el 2030 y 0.031 para el 2050.

## Sector eléctrico

El análisis del sector eléctrico se basa en un estudio comparativo entre un escenario tendencial acorde a las proyecciones del Programa Nacional del Sistema Eléctrico Nacional - PRODESEN 2019-2033- y un escenario de desarrollo sectorial alternativo de bajas emisiones de GEI alineado al presupuesto de carbono de 1.5 °C. En el escenario tendencial se estima que las emisiones de GEI no cumplirían con las metas de mitigación establecidas para el 2030 en la Contribución Nacionalmente Determinada de México (**NDC**, por sus siglas en inglés); y de manera importante se alejaría del nivel de emisiones requeridas para los escenarios de 1.5°C y 2°C.

La ruta de descarbonización propuesta para el sector eléctrico reduciría sus emisiones anuales a 64 MtCO<sub>2e</sub> para el 2030, un nivel menor a los requerimientos de mitigación del escenario de 1.5°C. Para lograr lo anterior, se requeriría duplicar la participación de las energías renovables en 2030, particularmente de energía eólica y solar fotovoltaica, con respecto al escenario tendencial. Asimismo, en esta ruta, las centrales basadas en combustibles fósiles con mayor intensidad de emisiones de GEI (carbón y combustóleo) serían retiradas; y otras tecnologías basadas en combustibles fósiles como el ciclo combinado a gas natural reducirían su participación en la matriz eléctrica. El escenario de descarbonización requeriría una capacidad instalada total de 11% superior al escenario tendencial debido a la alta penetración de energías renovables<sup>1</sup>; las cuales, para el 2030, alcanzaría una generación de 277 TWh (aproximadamente 53.7% de la demanda).

El escenario de descarbonización para el periodo 2019-2030 superaría únicamente en 5% los costos totales del escenario de desarrollo tendencial. Sin embargo, la diferencia entre los costos de ambos escenarios se revertiría, si se consideran las externalidades positivas derivadas de la descarbonización del sector, por ejemplo, la reducción de riesgos climáticos y los impactos a la salud asociados a la contaminación local del aire. La estimación de la curva de costos marginales de abatimiento (MACC, por sus siglas en inglés) muestra la costo-efectividad de las inversiones en energía geotérmica, eólica y solar fotovoltaica, por ahorros en el uso de combustibles fósiles. El desarrollo de energía solar distribuida requiere de la creación de

---

<sup>1</sup> Energía eólica, solar fotovoltaica, hidráulica, geotérmica y generación distribuida.

esquemas de financiamiento, lo cual incrementaría la rentabilidad para escalar su cobertura y participación en la generación de electricidad.

En el periodo 2030-2050, el sector eléctrico podría presentar una trayectoria de descarbonización acorde con la trayectoria de emisiones de 1.5°C. En este periodo la descarbonización del sector podría ralentizarse debido a: *i)* una creciente penetración de vehículos eléctricos y como consecuencia, el incremento en la demanda de electricidad; y *ii)* la participación significativa, aunque menor, de ciclos combinados de gas natural. Sin embargo, debido a la incertidumbre asociada a este marco temporal, algunos factores podrían ampliar el potencial de descarbonización del sector como la reducción en los costos de las tecnologías de almacenamiento y su disponibilidad comercial a gran escala, así como una alta penetración de la energía solar distribuida.

### Sector petróleo y gas

El análisis del sector industria de petróleo y gas se basó en un estudio comparativo entre un escenario basado en los planes de producción de hidrocarburos del gobierno federal, un escenario de agotamiento natural de estos recursos y un escenario de descarbonización alineado con el presupuesto de carbono. Tanto el escenario de expansión gubernamental como de agotamiento de recursos excederían el nivel de emisiones para el escenario de 1.5° C en el periodo 2019-2030. Para lograr la descarbonización del sector, se requeriría la implementación de medidas de mitigación específicas para las actividades de: *i)* producción de petróleo y gas; *ii)* refinación de petróleo; y *iii)* procesamiento de gas natural. Entre estas medidas se incluyeron: la cogeneración; el aumento en la eficiencia energética en la refinación y el procesamiento de gas; la detección y reparación de fugas de metano; y el uso racional de los recursos naturales a través de la reducción del venteo de gas y la recuperación mejorada de petróleo, entre otras.

La industria del petróleo y gas tienen un potencial de reducción anual de 25 MtCO<sub>2e</sub> para el 2030. Las medidas de mitigación relacionadas con la reducción de fugas de metano en las actividades de procesamiento de gas, la eficiencia energética en los procesos de refinación de petróleo y la cogeneración tienen la mayor costo-efectividad. En contraste, las medidas de mitigación orientadas a las actividades de producción de petróleo y gas tienen menor rentabilidad.

Para el periodo 2030-2050, el factible agotamiento natural de los recursos petrolíferos convencionales puede reducir las emisiones del sector. Sin embargo, en cualquiera de los escenarios planteados (con o sin la explotación de recursos no convencionales) las emisiones del sector superan el nivel requerido para mantener el aumento de la temperatura global en 1.5° C. Es por lo anterior que, es necesaria la adopción de medidas adicionales a las planteadas para el periodo a 2030. En este periodo existe una alta incertidumbre relacionada a factores como la evolución de la economía y la política climática o el desarrollo de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. No obstante, los resultados de este estudio muestran que es necesario mantener los recursos no convencionales sin quemar para alcanzar una ruta de descarbonización profunda en el sector.



## Sector transporte

El análisis del sector transporte se basa en un estudio comparativo entre un escenario de desarrollo tendencial y un escenario de descarbonización en el que se instrumentan diversas medidas de mitigación. Este análisis utiliza el marco de trabajo denominado *evitar-cambiar-mejorar*, el cual permite considerar las diversas políticas y acciones de mitigación que toman en cuenta la demanda de transporte, la distribución modal, emisiones asociadas a energía y otras condiciones del sector.

En el escenario tendencial del sector transporte se estima un crecimiento significativo del transporte por carretera individual del 42% en 2017 al 58% en 2050 para todos los kilómetros de pasajeros recorridos. Los modos de carga tienen un incremento anual sostenido del 3% entre 2017-2030, el cual posteriormente tendría una ligera reducción al 2.5% para el periodo 2030-2050. Los vehículos ligeros de gasolina reducirían su participación del 96% de la flota de vehículos en 2017 a 94% para 2030, como resultado de una mayor penetración de los vehículos híbridos y eléctricos. Esta tendencia se profundizaría posterior a 2030, en donde se estima que los vehículos híbridos y eléctricos alcanzarían una participación del 11% de la flota vehicular para 2050. En el escenario tendencial se proyecta un aumento en las emisiones sectoriales de 166 MtCO<sub>2</sub>e en el 2017 a 317 MtCO<sub>2</sub>e para el 2050, lo cual representaría incremento en la contribución de emisiones de este sector del actual del 21% al 24% al final del periodo.

El escenario de descarbonización se basa en una estrategia de movilidad orientada a evitar los viajes de pasajeros y movilidad de carga; desplazar los viajes a modos de transporte sostenible y mejorar la eficiencia energética mediante la transición a combustibles más limpios. En este escenario la flota vehicular se reduce en 8% y 40% al 2030 con respecto al escenario tendencial y la penetración de vehículos eléctricos e híbridos alcanza el 23% y 91% respectivamente. Se consigue también incrementar la eficiencia energética entre 10 y 15% en modos no carreteros y en más del doble en modos carreteros. Como resultado, el escenario de descarbonización se traduce en una demanda energética de todo el sector menor al 66% respecto al escenario tendencial y en un abatimiento de emisiones GEI del 80%. Aún con estas medidas las emisiones acumuladas del periodo rebasan el presupuesto de carbono del sector de 1.5° C, lo cual revela la importancia de iniciar ahora la implementación de medidas ambiciosas de descarbonización que acerquen las emisiones del sector a los objetivos de mitigación de mediano y largo plazo.

*“The world is “way off track” in dealing with the climate emergency and time is fast running out”.*

António Guterres, Secretario General de la Naciones Unidas

## 1. Introducción

En el Acuerdo de París, la comunidad internacional estableció el compromiso de no exceder en 2 °C el aumento en la temperatura global promedio a finales de este siglo y fortalecer los esfuerzos políticos a fin de limitar este fenómeno a 1.5 °C. En el acuerdo, los países presentaron Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) que establece sus objetivos de mitigación de GEI, los cuales son sujeto de un proceso de revisión quinquenal enfocado a fortalecer la ambición de la acción climática (Hale, 2016; O’Neill, 2017). Estos procesos de revisión requieren de insumos de información y orientaciones sobre las trayectorias de emisiones nacionales, el alcance de la política climática y su impacto en la temperatura global (Fransen, 2019).

En este reporte se desarrolla una metodología de presupuesto de carbono para México alineado a un escenario de calentamiento global de 1.5 °C (GIZ e ICM, 2019). Con base en este presupuesto de carbono, en el presente documento analizamos las rutas de descarbonización que los sectores eléctricos, de petróleo, gas y transporte deberían de seguir hacia el 2050. Los resultados de este estudio proporcionan elementos de referencia para entender y atender dos necesidades técnicas para el cumplimiento tanto de la NDC de México como de la Ley General de Cambio Climático: **1)** identifica las implicaciones a nivel país de un escenario de 2°C y 1.5°C en términos de las emisiones remanentes, y dentro de éstas **2)** la trayectoria para cada sector, su comportamiento y las principales acciones de mitigación a considerar para cumplir el mandato de Ley y los compromisos internacionales. De esta manera, los resultados de este análisis ofrecen orientaciones para la toma de decisiones en la planeación de la política climática.

## 2. La trayectoria de emisiones de GEI de México hacia el 2050

La ciencia climática ha establecido la relación entre las emisiones de GEI y los cambios en el forzamiento radiativo o la diferencia entre la insolación absorbida por la tierra y la energía que irradia el planeta de vuelta al espacio. Asimismo, los efectos que las variaciones en el forzamiento radiativo tienen sobre la temperatura promedio de la superficie del planeta en el tiempo (Collins et al., 2013; Gillett et al., 2013). El avance en este campo de investigación ha permitido el desarrollo de instrumentos, entre los cuales se encuentran los presupuestos de carbono, que permiten estimar la cantidad de GEI que las actividades humanas pueden emitir a la atmósfera respecto a metas específicas de calentamiento global (Gignac et al., 2015; Gignac y Matthews, 2015; Knutti y Rogelj, 2015).

El presupuesto de carbono es una metodología que permite proyectar una trayectoria de GEI consistente con un escenario de calentamiento global, para un periodo de tiempo. La implementación internacional de presupuestos de carbono ha aportado información relevante para la planeación de políticas de mitigación consistentes con las metas climáticas, la evaluación del alcance y desempeño de las acciones de mitigación y la transparencia y rendición de cuentas de estas acciones y políticas, entre otras. Por ello, el presente análisis se basa en la caracterización de un presupuesto de carbono para México alineado a escenarios de calentamiento global a 1.5 °C y 2 °C, y posteriormente, examina las implicaciones de estos presupuestos para los principales sectores emisiones de GEI: *i*) electricidad, *ii*) gas y petróleo y *iii*) transporte.

La metodología para el escenario de 2 °C empleó las bases de datos elaboradas por el Grupo de Trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y por el Instituto de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA, por sus siglas en inglés) sobre la trayectoria de emisiones de GEI consistentes con este nivel de calentamiento global. Esta metodología utilizó como referencia la trayectoria RCP2.6 del AR5<sup>2</sup> y los modelos para el escenario P1<sup>3</sup>. Los modelos seleccionados tienen una probabilidad igual o mayor a 66% de mantener el incremento de la temperatura por debajo de los 2 °C para finales del siglo. El escenario de 1.5 °C siguió una metodología similar. Sin embargo, en este caso se utilizó la base de datos de el “**Informe especial: calentamiento global de 1.5 °C**”<sup>4</sup> y las proyecciones para los escenarios SSP<sup>5</sup>.

La metodología desarrollada estimó un presupuesto de carbono a nivel global de 1,007.5 GtCO<sub>2</sub> para el escenario de 2 °C para el periodo 2011-2100, similar a investigaciones precedentes (e.g., IPCC, 2018; Gignac y Matthews, 2015; Knutti y Rogelj, 2015; Rogelj et al., 2015). Con base en la contribución histórica de México en las emisiones globales de GEI (1.39%) se asignaron las emisiones correspondientes a nivel país. Posteriormente, ambos resultados fueron ajustados al “Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015” y se estimaron las emisiones del país para el periodo 2010-2018. El presupuesto de carbono de México para el periodo 2019-2100 fue evaluado en 22.2 GtCO<sub>2e</sub> para el escenario de 2 °C y 8.89 GtCO<sub>2e</sub> para el escenario de 1.5 °C (Ver **Figura 1 y 2**). Con base en estos resultados se estima que la trayectoria de mitigación en México tendría que alcanzar en el 2030 un nivel de emisiones de 0.561 GtCO<sub>2e</sub> para un escenario de 2 °C y 0.45 GtCO<sub>2e</sub> para un escenario de 1.5 °C.

---

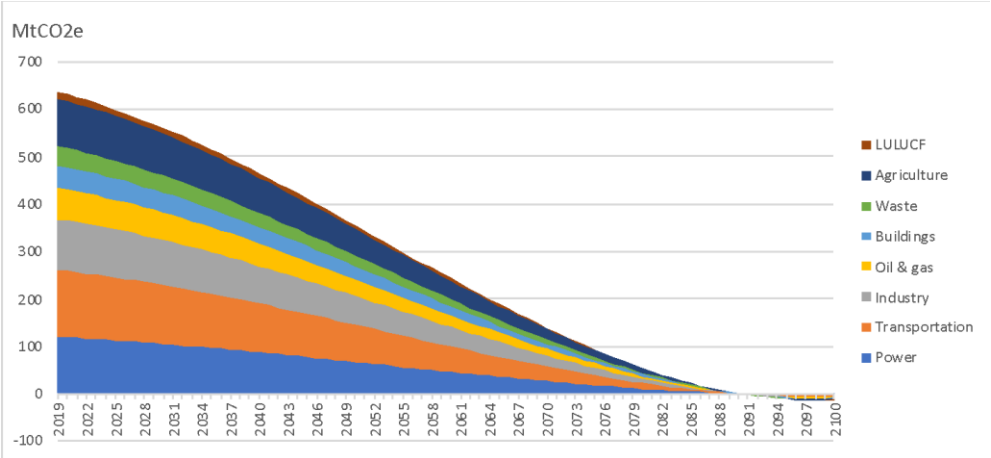
<sup>2</sup> Esta trayectoria, entre otros elementos, se caracteriza por alcanzar un pico en el forzamiento radiativo de  $\sim 3 \text{ Wm}^{-2}$  ( $\sim 490$  ppm CO<sub>2eq</sub>) y su posterior declive en torno a  $2.6 \text{ Wm}^{-2}$  para finales del siglo.

<sup>3</sup> El escenario P1 se deriva del “Reporte síntesis de la ONU sobre el efecto agregado de los compromisos climáticos nacionales” y se caracteriza por asumir la implementación de medidas de mitigación a partir del 2010, lo cual permite una trayectoria de emisiones de GEI que reduce los costos asociados durante el presente siglo.

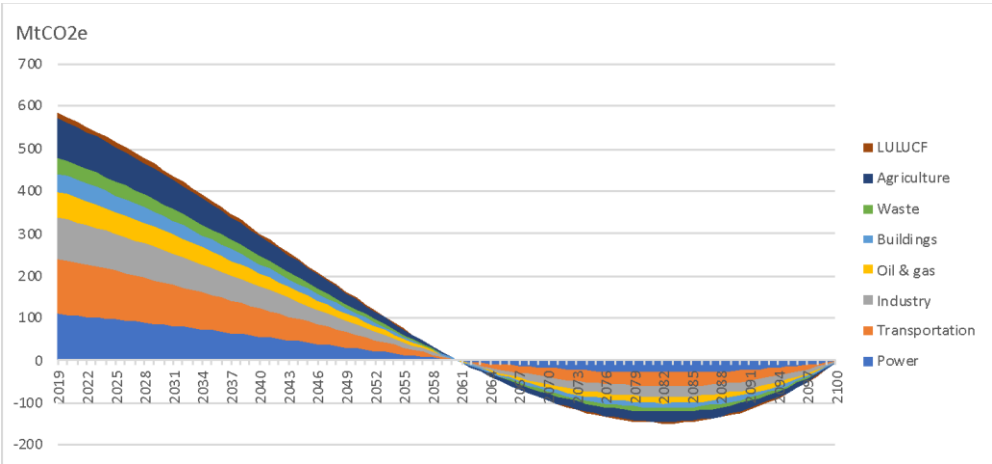
<sup>4</sup> Capítulo 2 Material Complementario- IPCC, 2018.

<sup>5</sup> Los escenarios SSP se caracterizan por alcanzar un forzamiento radiativo de  $1.9 \text{ Wm}^{-2}$  para fines del siglo.

**Figura 1.** Presupuesto de carbono de 2 °C para México con asignación sectorial.



**Figura 2.** Presupuesto de carbono de 1.5 °C para México con asignación sectorial.



La asignación de los presupuestos de carbono a los distintos sectores se basó en las emisiones históricas y prospectivas para cada uno de éstos<sup>6</sup>, de los cuales se seleccionó como referencia WRI (2017). Como se muestra en la **Tabla 1**, los sectores objeto de análisis en este estudio tuvieron una asignación constante de 19% para generación de electricidad, 10% para petróleo y gas y 22% en el caso de transporte.

<sup>6</sup> Los modelos examinados fueron: McKinsey e INECC, 2013; Centro Mario Molina, 2015; WRI, 2017 .

**Tabla 1.** Asignación constante por sector de los presupuestos de carbono de 2 °C and 1.5 °C de México para el periodo 2019-2100.

Sector	Asignación constante (%)	Presupuesto de carbono 2 °C (GtCO <sub>2e</sub> ) (+)	Presupuesto de carbono 1.5 °C (GtCO <sub>2e</sub> ) (+)
Generación de electricidad	19	4.0	1.6
Transporte	22	4.8	1.9
Industria	17	3.7	1.5
Petróleo y gas	10	2.2	0.9
Residencial y comercial	8	1.8	0.7
Residuos	6	1.3	0.5
Agricultura	16	3.5	1.4
Uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura	2	0.4	0.2
TOTAL	100	22.2	8.9

Nota: (+) Las cifras redondeadas pueden no sumar el total.

La trayectoria de emisiones es una herramienta que permite identificar y entender el comportamiento esperado de los sectores fuentes de emisión de GEI, en un lapso determinado. En este documento, el análisis presentado ofrece un escenario de referencia en el marco del presupuesto de carbono, en línea con los objetivos de largo plazo del Artículo 2 (a) del Acuerdo de París. Este escenario, permite valorar las medidas necesarias para estabilizar las emisiones para cada uno de los sectores, incluyendo su costo-beneficio. El análisis sectorial, se presenta a continuación.

### 3. Ruta de descarbonización del sector eléctrico

Como se mostró en la **Sección 2**, el presupuesto de carbono del sector eléctrico para un escenario de 2°C se estima en 4.0 GtCO<sub>2e</sub> para el periodo 2019-2100. En este caso, el nivel de emisiones para 2030 es de 100 MtCO<sub>2e</sub>. Para el escenario de 1.5 °C el presupuesto de carbono es de 1.6 GtCO<sub>2e</sub> para el mismo periodo, y el nivel de emisiones para 2030 es de 80 MtCO<sub>2e</sub>. En esta sección se examina la ruta de descarbonización del sector eléctrico en un escenario de emisiones alineado al presupuesto de carbono de 1.5 °C, considerando su viabilidad técnica y económica.

En México, en 2018, el sector eléctrico tiene una capacidad instalada de 75.7 GW. El 70.5% de ella corresponde a tecnologías basadas en combustibles fósiles y el 29.5% restante a centrales eléctricas con tecnologías limpias (SENER, 2018). La generación de electricidad se estima en 329,162 GWh en donde las tecnologías con mayor participación son el ciclo combinado con gas natural (50%), termoeléctricas convencionales con combustóleo (13%), carboeléctricas (9%) e hidroeléctricas (10%). Las tecnologías limpias con mayor generación corresponden a la hidroeléctrica, seguida por la nuclear y la eólica (ver **Figura 3**). Las emisiones anuales de GEI de la generación de electricidad se estiman en torno a 125-127 MtCO<sub>2e</sub> (SENER, 2018; IEA, 2020), representando el 20% del total de emisiones nacionales.

Con la finalidad de identificar cómo lograr que las emisiones del sector se encuentren dentro del presupuesto de carbono con una trayectoria de referencia para la planeación desde un enfoque climático, el presente análisis se basa en la comparación de un escenario de desarrollo tendencial (**E1**) y un escenario de descarbonización (**E2**). Estos escenarios fueron modelados con PLEXOS<sup>7</sup>, para los cuales se consideró 2018 como el año base y se utilizó la información oficial disponible. Para el **E1**, se utilizaron las estimaciones y datos del PRODESEN 2018-2032 y PRODESEN 2019-2033 (crecimiento en la demanda eléctrica, ampliación de la capacidad instalada por tecnología, retiro e instalación de plantas eléctricas, entre otros). Por otra parte, el **E2** toma el presupuesto de carbono como la vía principal en el desarrollo sectorial, tomando dos periodos de análisis, de 2019 a 2030 y de 2030 a 2050.

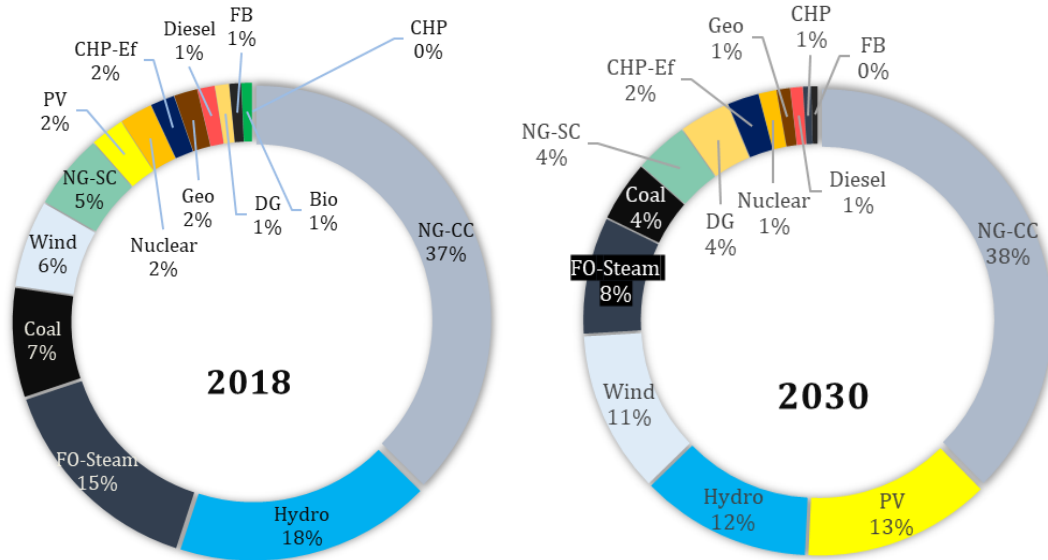
#### 3.1 Escenario tendencial (E1)

En el **E1** se estima una ampliación de la capacidad instalada de 59,242 MW adicionales para el periodo 2019-2030. Del crecimiento en esta capacidad, el 55.5% proviene de energías renovables, 41.6% de combustibles fósiles y 2.9% de tecnologías que no utilizan combustibles fósiles, o energías limpias (ver **Figura 3**).

---

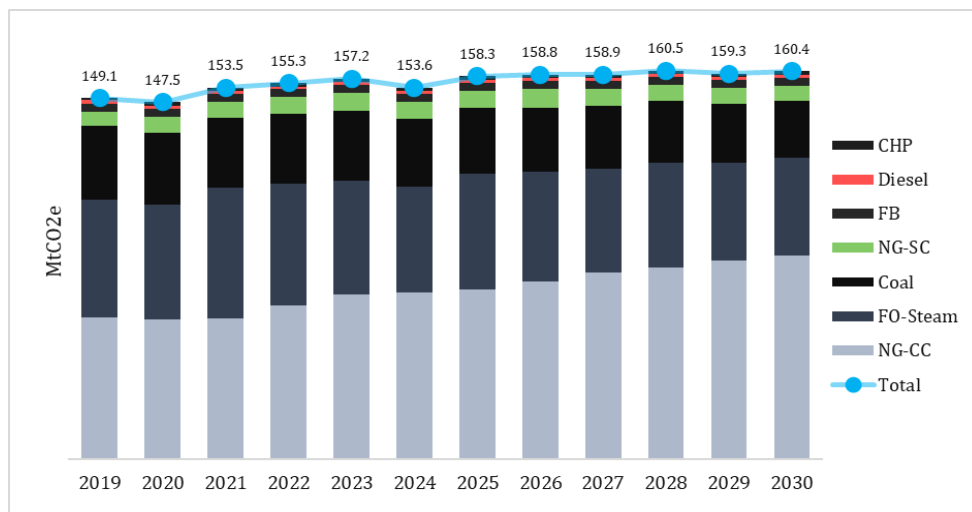
<sup>7</sup> Modelo de programación lineal de expansión de la capacidad eléctrica.

**Figura 3.** Evolución de la capacidad instalada del E1 a 2030.



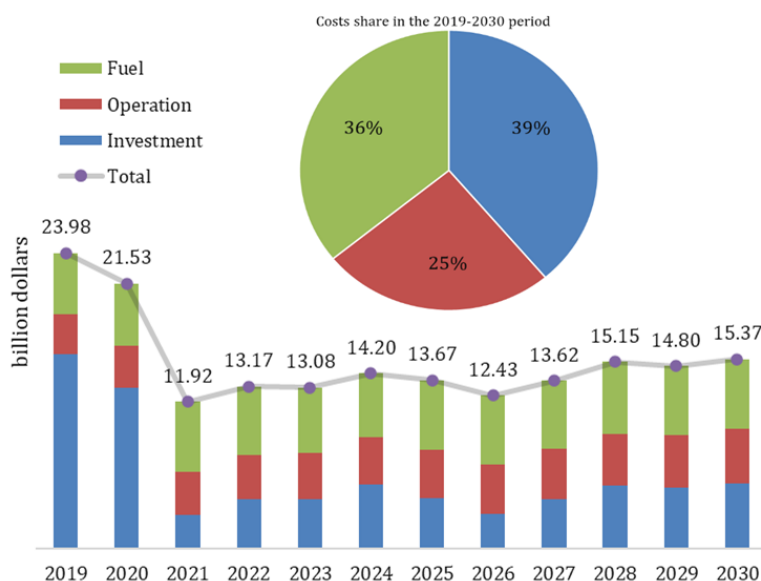
Entre 2019-2030, con respecto a la generación, las energías renovables tienen un crecimiento importante en el sector. La generación eólica pasa de 19.8 TWh a 40.2 TWh; la solar fotovoltaica de 14.9 TWh a 40.6 TWh; la hidroeléctrica de 32.3 TWh a 40 TWh y la generación distribuida de 1.7 TWh a 9.9 TWh. Sin embargo, el nivel de producción de electricidad a partir de combustibles fósiles se mantiene, e incluso aumenta para el caso de del ciclo combinado con gas natural: 244.3 TWh para el 2030. Como resultado, las emisiones de GEI de la generación de electricidad se estiman en 160.4 MtCO<sub>2e</sub> para el 2030, un nivel superior a las emisiones actuales (124 MtCO<sub>2e</sub>) y a los objetivos sectoriales establecidos en la NDC de México (139 MtCO<sub>2e</sub> para el 2030). Ver **Figura 4**.

**Figura 4.** Emisiones de gases de efecto invernadero en escenario tendencial (E1).



En este escenario se estima un costo total de 182.9 mil millones de dólares para el periodo 2019-2030. Como se muestra en la **Figura 5**, los combustibles representan el principal costo de este escenario (36%), seguido por la inversión (30%) y la operación (25%). Desde una perspectiva de soberanía energética, depender de los combustibles fósiles (y su variación en el mercado internacional) como principal componente del costo eléctrico, no es lo más conveniente, para la sostenibilidad financiera del sector.

**Figura 5.** Costo del escenario tendencial (E1)

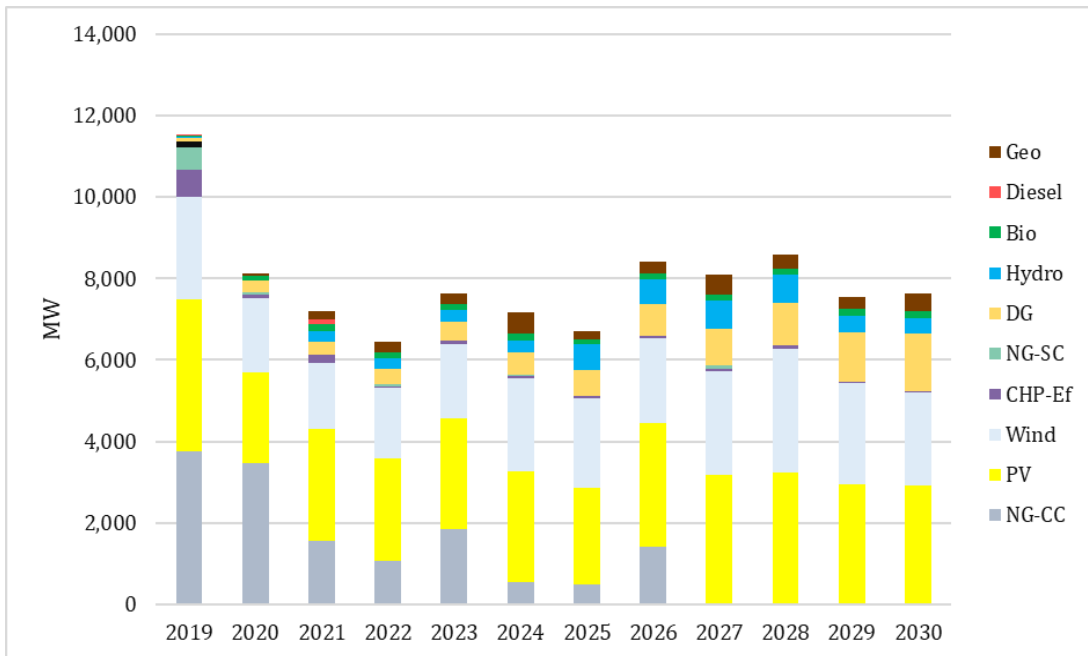


### 3.2 Escenario de descarbonización (E2)

En el **E2** se estima que el sistema eléctrico requiere una ampliación en la capacidad instalada de 93,480 MW para el periodo 2019-2030 debido al menor factor de planta de las energías renovables. Entre 2019-2026, la capacidad instalada adicional proviene principalmente de tecnologías como la solar fotovoltaica, la eólica y las plantas de ciclo combinado alimentadas con gas natural. En este escenario, a partir de 2027, las energías renovables cubren los requerimientos de ampliación del sistema con un crecimiento marginal de las tecnologías basadas en combustibles fósiles. Como resultado de ello, entre 2019-2030, las energías renovables representan el 80.4% de la incorporación de nueva capacidad en el sistema, mientras que las tecnologías basadas en combustibles fósiles el 16.2%, y otras tecnologías no fósiles el 3.4% (ver **Figura 6**).

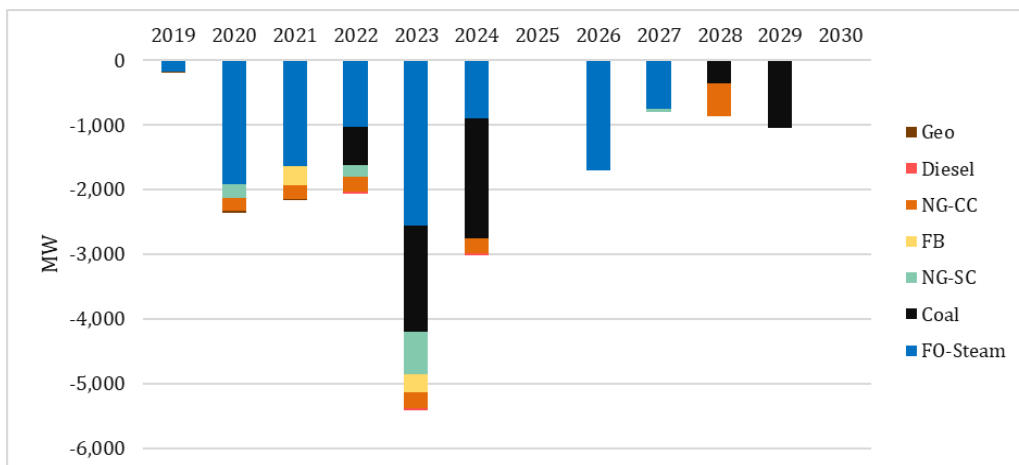


**Figura 6.** Crecimiento en la capacidad instalada en el escenario de descarbonización.



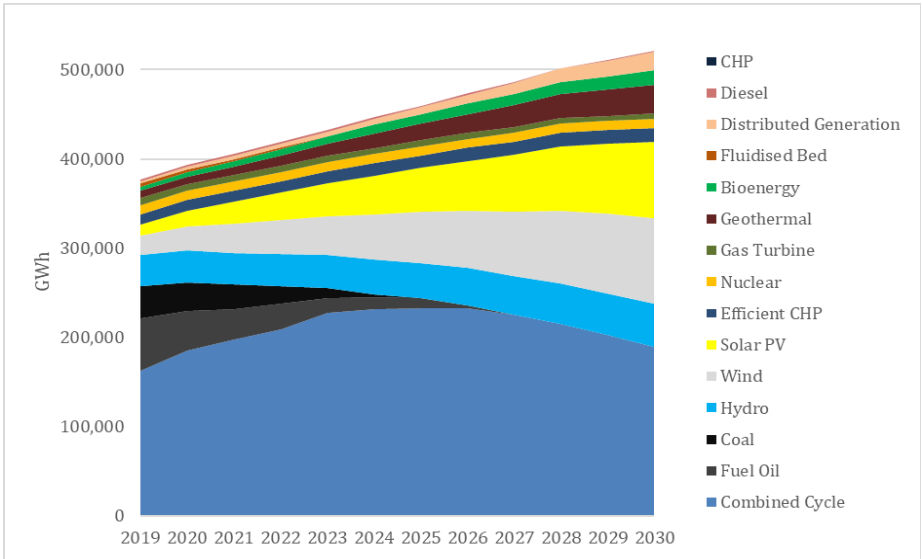
Como resultado del retiro de unidades (carboeléctricas y termoeléctricas convencionales) que han cumplido con su ciclo de vida económica y que además tienen una alta intensidad de emisiones de GEI, en el **E2** se reduce la participación de las tecnologías basadas en combustibles fósiles. Las tecnologías con mayor reducción en la capacidad instalada corresponden a las centrales de combustóleo (10.6 GW) y las carboeléctricas (5.5 GW) (ver **Figura 7**).

**Figura 7.** Retiro de capacidad en escenario de descarbonización.



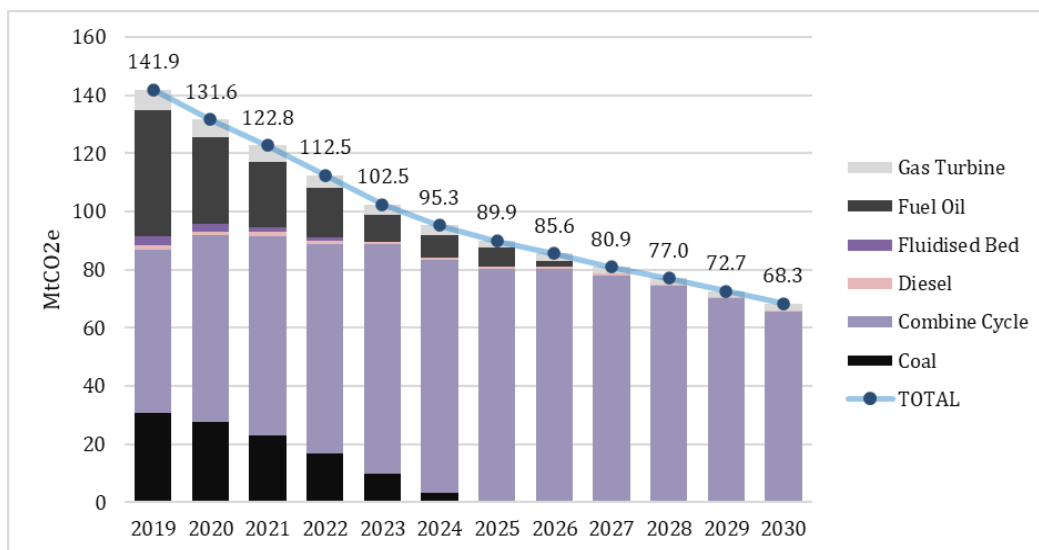
Como se mencionó, entre 2019-2030, la generación de electricidad transita de los combustibles fósiles a las de energías renovables (ver **Figura 8**). En este escenario, el ciclo combinado aumenta en 28 TWh. Sin embargo, la participación de esta tecnología en la matriz de generación eléctrica disminuye de 43% a 37% con respecto a 2019. En el caso de las energías renovables, los principales cambios proyectados son el aumento en la generación por tecnología eólica (93.9 TWh equivalentes al 18% de la generación total de 2030), solar fotovoltaica (83.2 TWh; 16% de participación), geotérmica (32 TWh; 6%), generación distribuida (20.8 TWh; 4%) y bioenergía (16.4 TWh; 3%). Cabe destacar que, en 2019 la participación conjunta de estas tecnologías en la generación de electricidad se estima en sólo un 11%.

**Figura 8.** Cambio en la matriz eléctrica en el escenario de descarbonización para el periodo 2019-2030



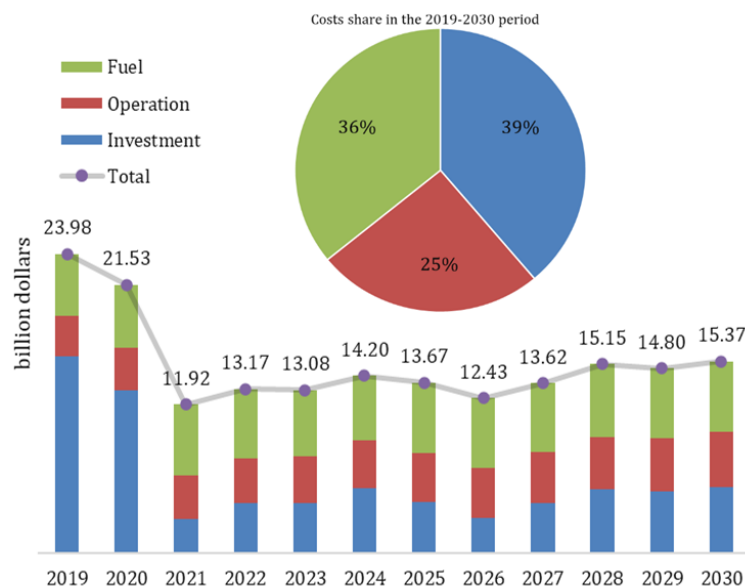
El **E2** presenta una importante reducción en las emisiones de GEI del sector con una tasa promedio anual del 6.5% (ver **Figura 9**). Por ello, la generación de electricidad emite 68.3 MtCO<sub>2</sub>e en 2030, lo cual representaría un nivel de emisiones 52% menor con respecto a las emisiones del 2019 y 57% menor con respecto a las emisiones proyectadas para el 2030 en escenario **E1**. De manera importante, el nivel de emisiones de este sector se alinea con la trayectoria de emisiones estimada para un escenario de calentamiento global de 1.5 °C.

**Figura 9.** Trayectoria de emisiones del E2.



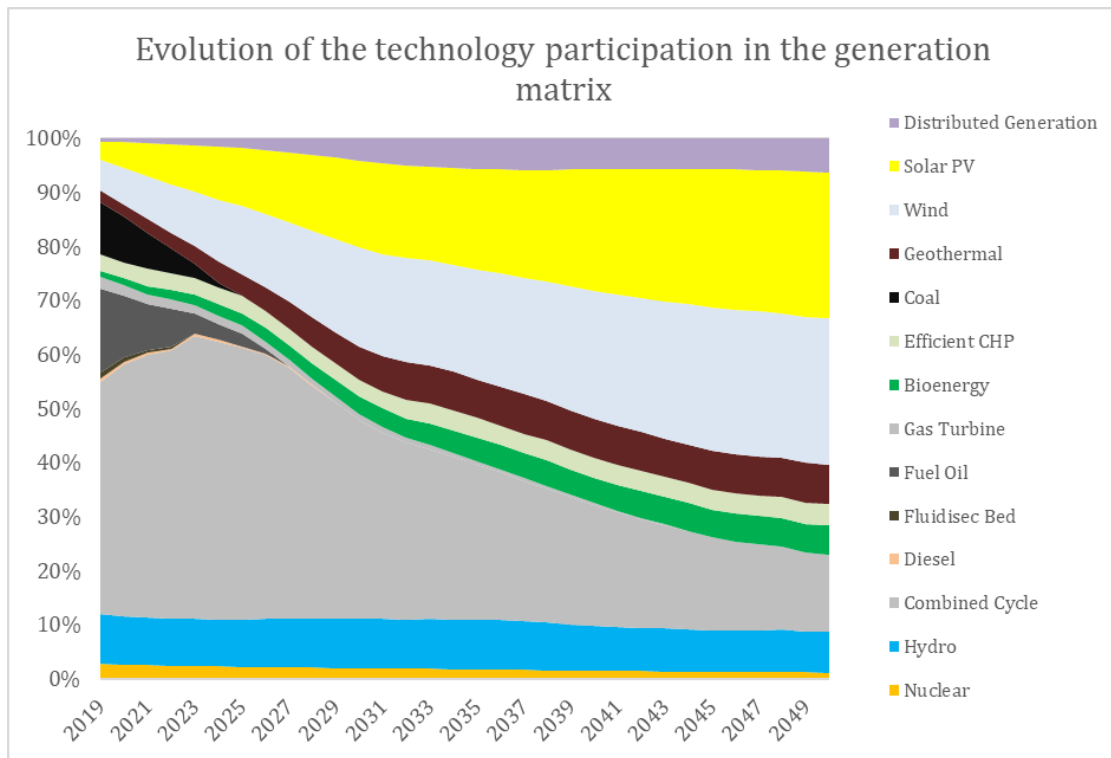
El costo total del **E2** para el periodo 2019-2030 se estima en 292.5 mil millones de dólares. Como se muestra en la **Figura 10**, la inversión representa el principal costo de este escenario (57%), seguido por el combustible (34%) y la operación (9%). Entre 2019 y 2020 se presentan los mayores costos del **E2**, particularmente en el rubro de inversión. Posteriormente, se proyecta una reducción y estabilización de los costos.

**Figura 10.** Costo del escenario de descarbonización (E2).



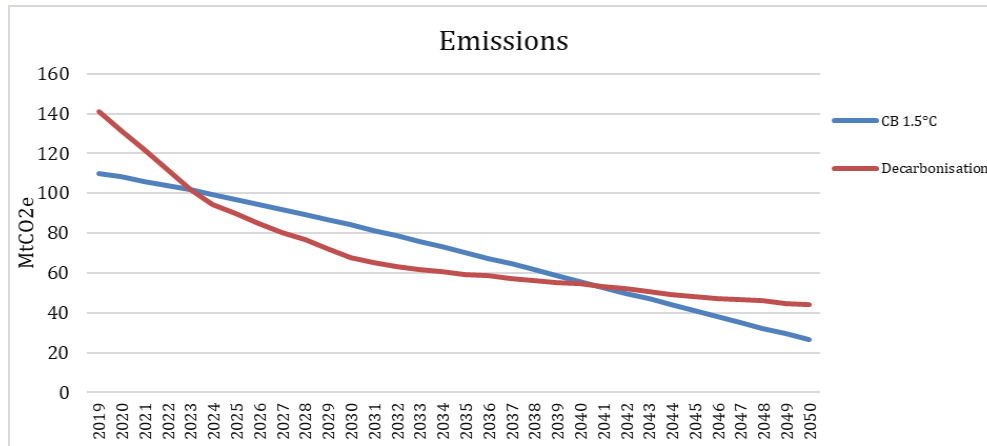
El **E2** para el periodo 2030-2050 se construyó bajo la suposición de una tendencia inercial en el sector (sin cambios sustantivos a nivel tecnológico o regulatorio), así como una demanda de electricidad creciente, incluyendo la penetración de vehículos eléctricos. En este periodo se proyectó que los vehículos eléctricos podrían representar hasta 30% de la demanda total, lo cual podría reducir la tasa de descarbonización con respecto al periodo 2019-2030. Para este escenario se requeriría una capacidad instalada cuatro veces mayor con respecto al 2018.

**Figura 11.** Evolución de la participación tecnológica en la matriz de generación.



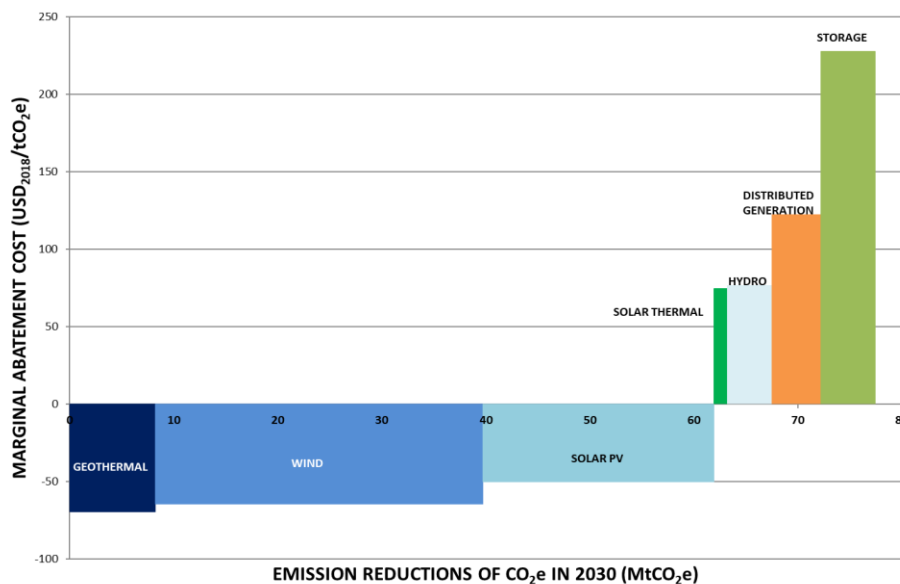
En el **E2** para 2030-2050, la participación del ciclo combinado se reduce de 52% en 2023 a 14% para el 2050; mientras que las otras tecnologías basadas en combustibles fósiles serían retiradas (ver **Figura 11**). Para este caso, la demanda de electricidad es cubierta por la energía eólica y la solar fotovoltaica, con una participación del 27%. Otras energías renovables también tienen un incremento en su participación, como la geotérmica (7%), la generación distribuida (6%) y la bioenergía (5%). La energía hidráulica mantiene su participación en torno al 8%. En este escenario, el sistema eléctrico reduce sus emisiones a 44 MtCO<sub>2</sub>e para el 2050, lo cual representa el 30% de las emisiones del sector en 2019 (ver **Figura 12**).

**Figura 12.** Emisiones del escenario de descarbonización y la ruta 1.5 °C para el 2050.



La estimación de la curva de costo marginal de abatimiento (MACC, por sus siglas en inglés) muestra la rentabilidad económica de algunas tecnologías de mitigación para el sector. En el análisis se comparó el costo marginal para el periodo 2019-2030 con base en los precios de 2018 y la estimación de costos y penetración de las tecnologías de los escenarios E1 y E2. Como se muestra en la **Figura 13**, las energías geotérmica, eólica y solar fotovoltaica presentan costos negativos, lo cual indica su rentabilidad, dado que los beneficios por el ahorro en el uso de combustibles son mayores que las inversiones en estas tecnologías. Los costos de inversión para la energía geotérmica e hidroeléctrica tienen un grado de incertidumbre debido a que el costo de estas tecnologías depende de su ubicación geográfica. La generación distribuida tiene un costo marginal positivo. Sin embargo, la implementación de esquemas financieros como el Programa Hogares Solares pueden aumentar la rentabilidad de esta alternativa tecnológica.

**Figura 13.** Curva de reducción marginal de costos para el sector eléctrico en 2030.



## 4. Ruta de descarbonización del sector petróleo y gas

Como se mostró en la **sección 2**, el presupuesto de carbono para el sector petróleo y gas para el periodo 2019-2100 se estima en 2.2 GtCO<sub>2e</sub> para el escenario de 2 °C y en 0.9 GtCO<sub>2e</sub> para un escenario de 1.5 °C. En esta sección se presenta el análisis sobre la ruta de descarbonización a seguir en el sector de petróleo y gas para el 2030 y 2050 para alinear sus emisiones de GEI a las metas de temperatura del Acuerdo de París, así como sus implicaciones técnicas y económicas. El análisis compara un escenario de desarrollo del sector acorde a las proyecciones gubernamentales (**PyG1**), un escenario de agotamiento natural del petróleo y gas (**PyG2**) y un escenario de descarbonización alineado al presupuesto de carbono (**PyG3**). Estos escenarios fueron modelados utilizando un enfoque de abajo hacia arriba con gran detalle técnico y se consideró 2018 como el año base.

El **PyG1** retoma los planes del gobierno federal para expansión de la producción de petróleo y gas (CNH, 2019a), el procesamiento de gas natural y la refinación de petróleo (SENER, 2017; PEMEX, 2019a) (ver **Figura 14, 15 y 16**).

**Figura 14.** Producción de gas natural en escenario PyG1 (2020– 2033).

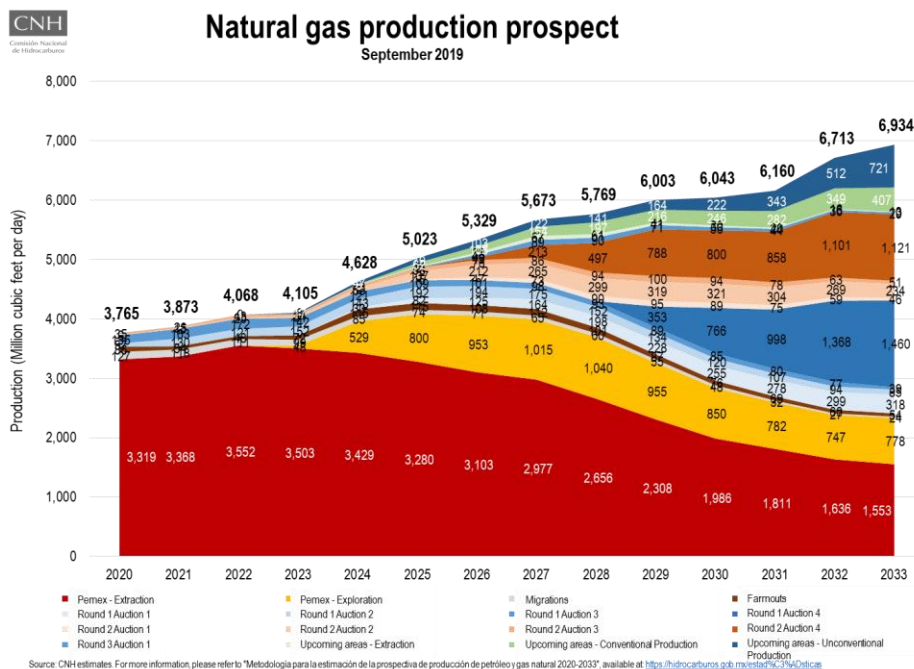
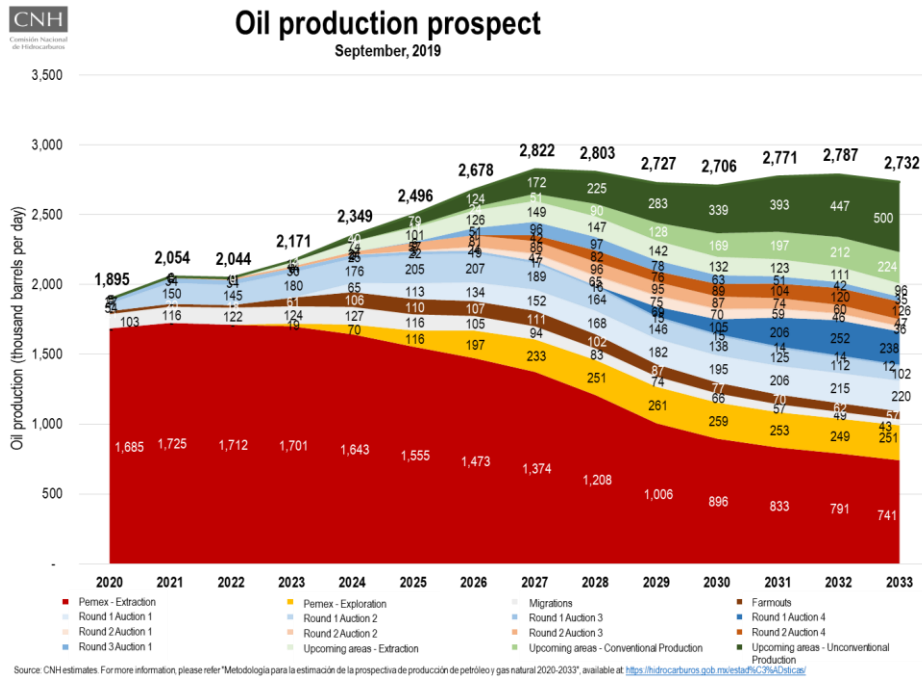
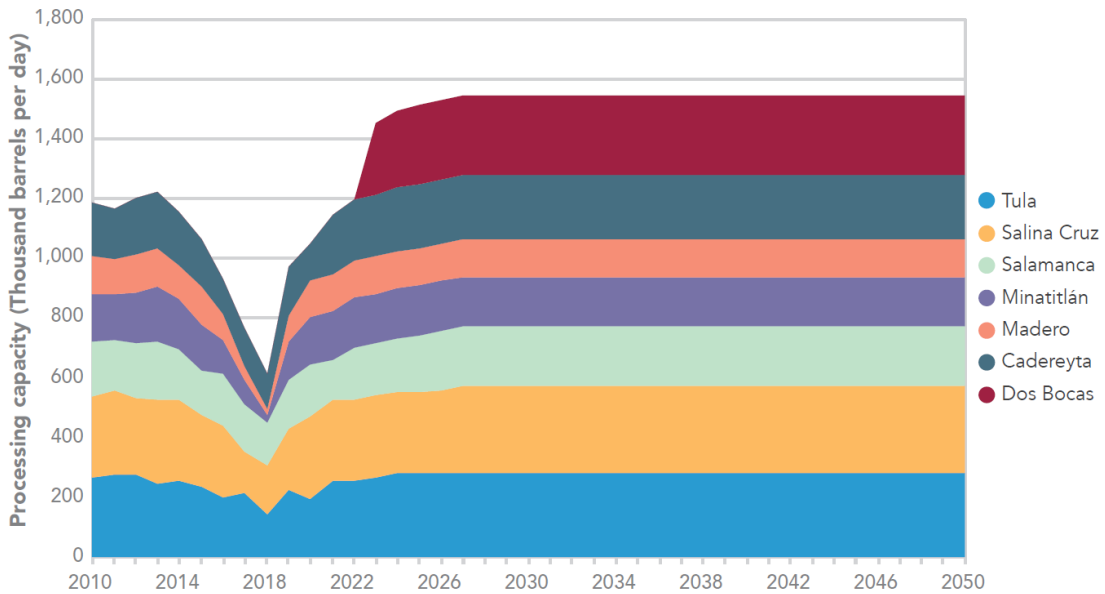


Figura 15. Producción de petróleo en escenario PyG1 (2020– 2033)



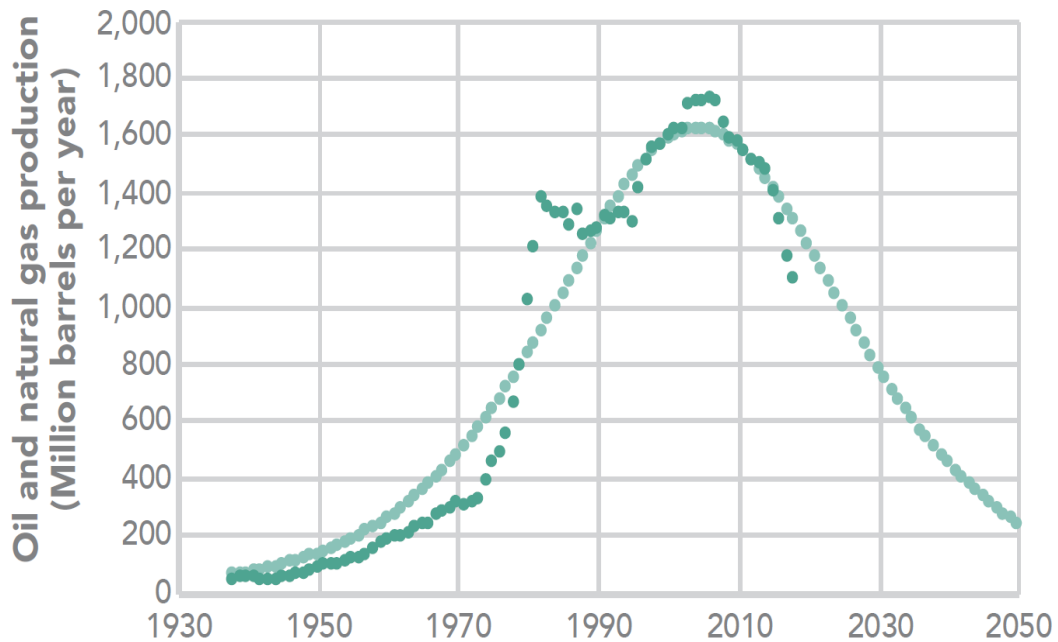
Fuente: CNH (2019)

Figura 16. Procesamiento de petróleo crudo en escenario PyG1 (2020– 2033).



El **PyG2** se fundamenta en la teoría de producción máxima, la cual expone que la producción de recursos naturales sigue una curva gaussiana en donde el pico de producción depende de las reservas existentes y los descubrimientos futuros (Hubbert, 1956; Towler, 2014; Ayala-Chávez, 2017). En este escenario, se retoma la información histórica de PEMEX sobre la producción y reservas totales de hidrocarburos (PEMEX, 1977; 1988; 1999; 2010; 2017; 2018) (ver **Figura 17**).

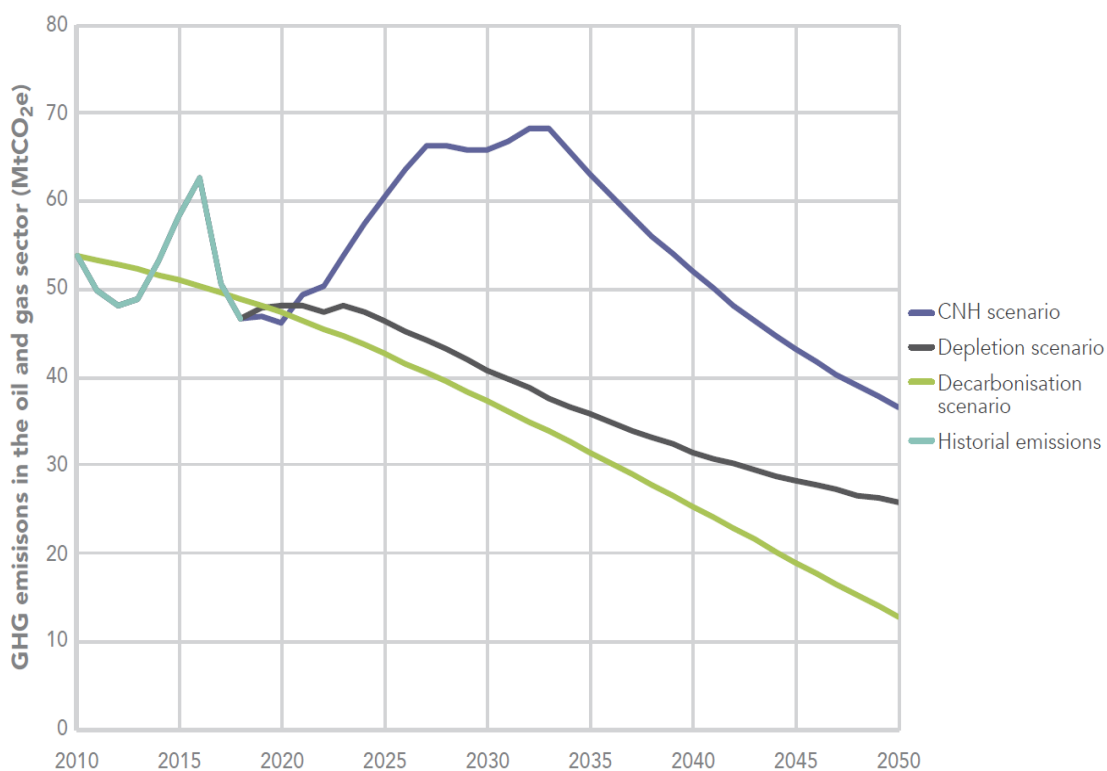
**Figura 17.** Producción histórica y prospectiva de petróleo y gas (PG2).



El **PyG3** retoma el presupuesto de carbono del sector para un escenario de 1.5 °C como marco de desarrollo para el sector de petróleo y gas. La definición de este escenario se basó en la metodología desarrollada por ICM para trazar la trayectoria de descarbonización y estimar el presupuesto de carbono. De esta manera, el presupuesto de carbono para el periodo 2019-2030 se estimó de 500 MtCO<sub>2e</sub> y de 979 MtCO<sub>2e</sub> para el período 2019-2050. La **Figura 18** resume la trayectoria de emisiones para los escenarios planteados. Es importante señalar que el escenario **PyG1**, naturalmente llevará a mayores emisiones de GEI, excediendo en 192 MtCO<sub>2e</sub> al presupuesto de carbono (**PyG3**) para el periodo 2019-2030 y en 754 MtCO<sub>2e</sub> para el periodo 2019-2050. Asimismo, las emisiones acumuladas del escenario **PyG2** superarán al presupuesto de carbono (**PyG3**) en 49 MtCO<sub>2e</sub> y en 204 MtCO<sub>2e</sub>, para los periodos 2019-2030 y 2019-2050, respectivamente.

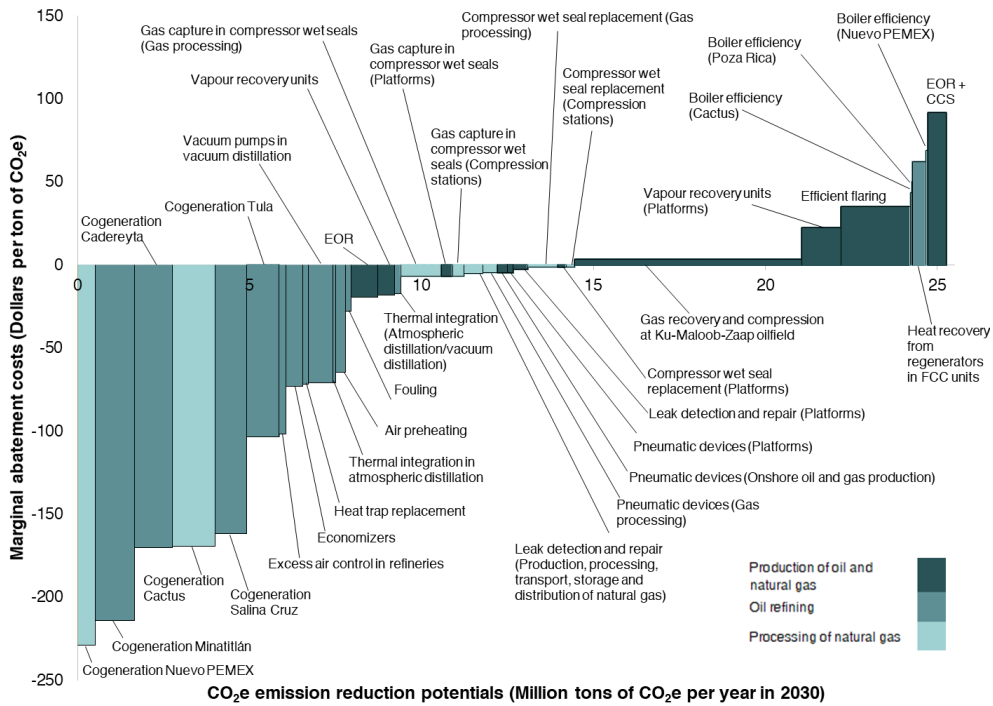


**Figura 18.** Escenario de emisiones de GEI para la industria de petróleo y gas.



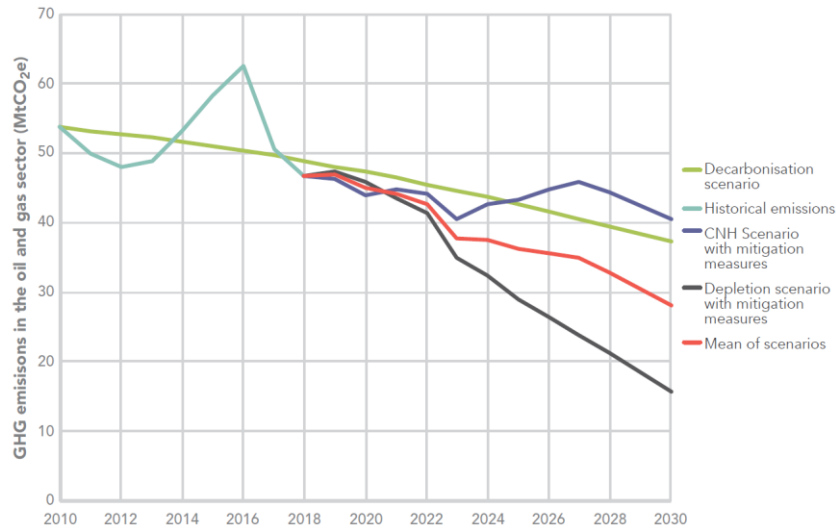
La estimación de la curva de costo marginal de abatimiento (MACC, por sus siglas en inglés) muestra un potencial total de reducción anual de 25 MtCO<sub>2</sub>e para el 2030. Como se muestra en la **Figura 19**, las medidas de mitigación relacionadas con la reducción de emisiones de metano en las actividades de procesamiento de gas, la eficiencia energética en los procesos de refinación de petróleo y la cogeneración tienen mayor costo-efectividad y un potencial de mitigación de aproximadamente 15 MtCO<sub>2</sub>e. En contraste, las medidas de mitigación orientadas a las actividades de producción de petróleo y gas tienen menor rentabilidad debido a que requieren inversiones que superan los beneficios económicos. Sin embargo, los beneficios ambientales son significativos, como en el caso de la reutilización de gas natural (compresión y envío a tierra), que podría incrementar el potencial de mitigación en 6.5 MtCO<sub>2</sub>e, la cual podrían implementarse con el apoyo de mecanismos de financiamiento internacionales.

**Figura 19.** Curva de costo marginal de abatimiento para la industria de petróleo y el gas.



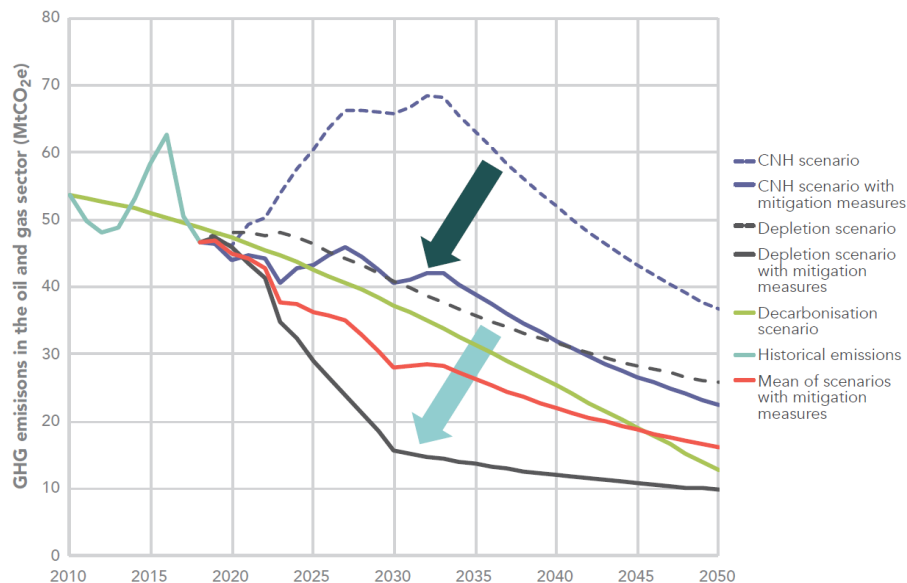
La adopción de las medidas antes mencionadas es clave para reducir las emisiones de GEI, que como se observó en la **Figura 18**, tienden a aumentar en los escenarios PyG1 y PyG2. Seguir la ruta de explotación de hidrocarburos (considerando recursos no convencionales) y aun considerando las medidas de mitigación, podría, a partir de 2024 aumentar las emisiones de GEI por encima de los niveles de descarbonización requeridos en este sector (ver **Figura 20**). En **PyG1**, las emisiones acumuladas para el periodo 2019-2030 alcanzarían 524 MtCO<sub>2e</sub>, lo cual superaría en 24 MtCO<sub>2e</sub> la estimación del presupuesto de carbono sectorial. En el **PyG2**, la tendencia de agotamiento natural, la necesidad de mantener los hidrocarburos no convencionales bajo tierra y la adopción de las medidas de mitigación contribuirían a reducir más emisiones de GEI, incluso por debajo al escenario de descarbonización. En este escenario se estima en 380 MtCO<sub>2e</sub> las emisiones acumuladas para el periodo 2019-2030. En una trayectoria intermedia entre las **PyG1** y **PyG2**, las emisiones acumuladas alcanzarían 452 MtCO<sub>2e</sub> para el mismo periodo.

**Figura 20.** Escenarios de descarbonización para el sector de petróleo y gas.



El análisis para el periodo 2030-2050 nuevamente muestra la necesidad de adoptar medidas de mitigación. Si bien, para el periodo 2019-2030 el escenario **PyG1** supera ligeramente el presupuesto de carbono, para el periodo 2030-2050 la descarbonización del sector requeriría de la adopción de una mayor cantidad de medidas de mitigación (ver **Figura 21**). Las proyecciones para el periodo 2030-2050 tienen una alta incertidumbre debido a factores como la evolución de la economía y la política climática o el desarrollo de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono. No obstante, los resultados de este análisis y particularmente del escenario **PyG2** muestran que, es necesario mantener los recursos no convencionales sin quemar para alcanzar una ruta de descarbonización profunda en el sector.

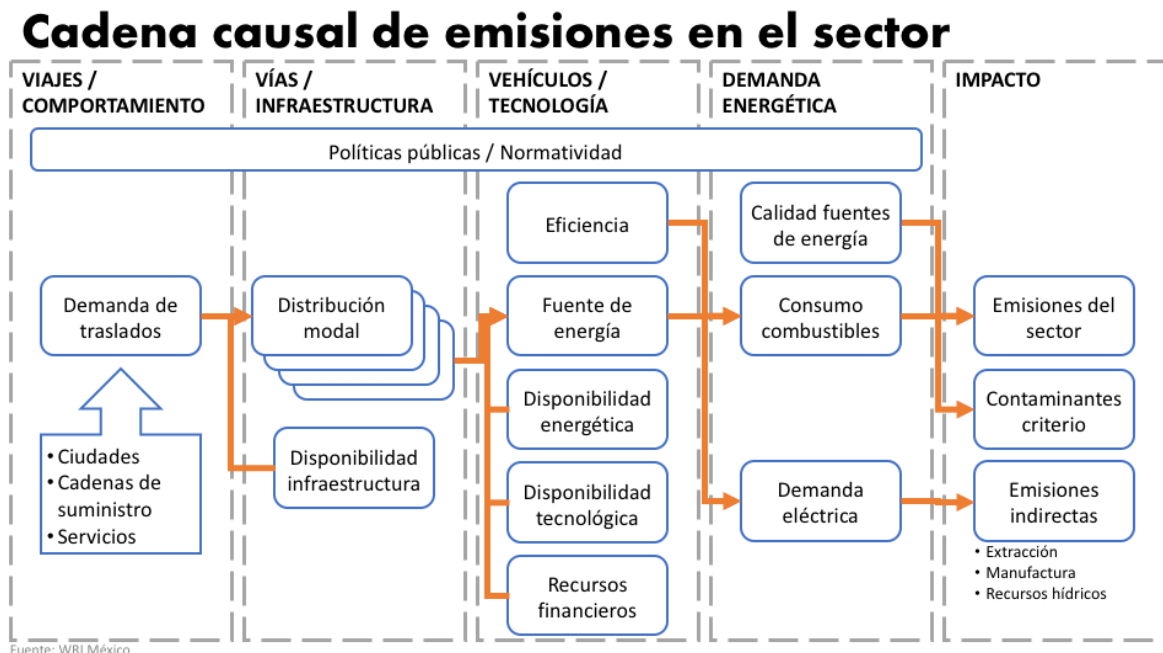
**Figura 21.** Escenarios de mitigación hacia el 2050



## 5. Ruta de descarbonización del sector transporte

Como se mostró en la **Sección 2**, el presupuesto de carbono para el sector transporte se estima en 1.9 **GtCO<sub>2</sub>e** para un escenario de 1.5 °C en el periodo 2019-2100, con una trayectoria de emisiones que alcanza 0.097 para el 2030 y 0.031 para el 2050. En este apartado se examinan las características de una ruta de descarbonización de este sector para el periodo 2019-2050 alineada a las metas de temperatura expresadas en el Acuerdo de París. El análisis compara un escenario de desarrollo tendencial del sector transporte (**T1**) y un escenario de descarbonización sectorial en el que se instrumentan diversas medidas de mitigación (**T2**).

Las emisiones de un sistema de transporte dependen de la actividad necesaria para satisfacer la demanda de traslado. La demanda de traslado es función 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 (ej., carreteras, vías, puertos, aeropuertos, banquetas), vehículos y energía para operarlos, infraestructura energética para generar, distribuir y surtir esa energía (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 genera las emisiones GEI y de contaminantes criterio 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.



## 5.1 Medidas de descarbonización del sector transporte

Dada la complejidad de los sistemas de transporte, las medidas de descarbonización se presentan dentro del marco de trabajo denominado: evitar-desplazar-mejorar (*avoid-shift-improve*). Este marco permite considerar medidas de mitigación dentro de un diseño de desarrollo urbano y movilidad sustentable. Este modelo sigue como premisa: i) evitar los viajes de pasajeros y el movimiento de cargas y reducir las distancias, por ejemplo, a través de la optimización logística y las políticas de planificación y desarrollo urbano; ii) desplazar los viajes necesarios a modos de transporte más sostenibles, por ejemplo, de transporte individual a transporte público masivo o movilidad activa; iii) mejorar la eficiencia energética y reducir la intensidad de emisiones de los combustibles, por ejemplo, mediante la transición hacia combustibles bajos en carbono, la electromovilidad y vehículos con mayores factores de carga.

Las estrategias para evitar viajes y reducir sus distancias deben jugar un papel significativo en el desarrollo del sector, ya que reducen el nivel de actividad y deben proveer mejor acceso a servicios y oportunidades en regiones menos conectadas. Su objetivo principal es desincentivar el uso de transporte motorizado, en particular el individual. Algunas de estas estrategias son: cargos de congestión, zonas libres de autos o de bajas emisiones y velocidad, políticas de estacionamiento, entre otras. Una herramienta clave en evitar viajes es la planeación de uso de suelo y zonificación. Mediante el desarrollo de planes nacionales de transporte sustentable y planes ciudadanos de movilidad urbana sustentable, se promueve la conectividad de vías, los usos mixtos y el desarrollo compacto centrado en transporte público. Las políticas implementadas en estos planes deben favorecer a los habitantes sobre los vehículos y prioriza los medios de transporte más sustentables.

Con referencia al enfoque de evitar viajes de carga, esto requiere una mejora logística y de eficiencia operativa, para optimizar los movimientos de materia prima, productos intermedios y bienes de consumo. Para esto se requiere un enfoque integral de procura de materia prima y distribución optimizada que maximice la ocupación de los vehículos y minimice los traslados y los cambios. El diseño de empaques más ligeros y menos voluminosos puede incrementar drásticamente los factores de carga. En cuanto a la distribución urbana final, o de última milla, pueden desarrollarse sistemas de consolidación a nivel ciudad, vecindario o edificio que, además de reducir emisiones, mejoran la seguridad y la calidad del aire.

En cuanto a estrategias para evitar el traslado no-carretero, es imprescindible buscar abatir la tasa de crecimiento y la demanda de este medio de transporte al mismo tiempo que se desarrollen alternativas tecnológicas para eliminar sus emisiones GEI. Las prácticas empresariales y turísticas también deben adaptarse a una realidad en la que el traslado aéreo tiene externalidades climáticas y debe racionalizarse.

Los subsidios al combustible generan un incentivo perverso al reducir el costo de traslado, esto incrementa la actividad, el consumo energético y la congestión y reduce la eficacia de otras medidas de mitigación. Adicionalmente es una medida regresiva que beneficia principalmente a los sectores de la población con mayor capacidad económica.

Las estrategias de desplazamiento de los viajes se enfocan en cambiar la distribución modal, incrementando la participación de viajes de bajas o nulas emisiones. Este esfuerzo requiere de un entorno de políticas y un sistema financiero que permita que las ciudades planeen e implementen sistemas de transporte público de alta calidad, accesibles y eficientes que se conecten de manera segura con infraestructura que facilite la movilidad de peatones y traslados no motorizados (movilidad activa). Un sistema de transporte público de alta calidad se caracteriza por ser confiable, seguro, frecuente, directo, conectado, accesible y económico. Adicionalmente es un sistema integrado que considera correspondencia de líneas y prioriza a los peatones y ciclistas, desplazando a los medios informales de transporte como minibuses y bases de taxis que no ofrecen seguridad a los usuarios ni a los operadores. México tiene oportunidades importantes para integrar planes de ciclovías y zonas peatonales o con calles completas (aquella que es segura, cómoda y conveniente para el traslado a pie, en bicicleta, en transporte colectivo y en automóvil, independientemente de la edad, habilidad o capacidad de las personas.).

Desplazar el transporte de carga, implica que se haga una proporción mucho mayor de los traslados en modos de menores emisiones como vías férreas, o bien que se optimicen los fletes incrementando factor de carga y reduciendo distancias y paradas. Los factores de carga pueden incrementarse utilizando vehículos de más alta capacidad con base a la actividad necesaria, incrementando la utilización de vehículos, co-distribución (colaboración entre empresas), reducción de los viajes vacíos mediante programación centralizada de rutas. Sin embargo, algunas de estas medidas también hacen más eficiente el transporte y pueden generar un efecto rebote de la demanda incremental derivada de la reducción de costo.

Las estrategias para mejorar los viajes se enfocan a la mejora del desempeño de los vehículos para reducir externalidades negativas. Las mejoras se reflejan tanto en eficiencia y tecnología como mejores decisiones de viaje (como viajes compartidos). Uno de los ejemplos más claros de políticas de mejora es la electrificación del transporte carretero individual (autos eléctricos), que puede tener muchos beneficios y resultan en menores emisiones GEI y mejoras en la calidad del aire. Sin embargo, es muy importante mencionar que los beneficios de la electrificación del transporte requieren de la descarbonización del suministro eléctrico para tener un efecto positivo. Adicionalmente, el sustituir autos convencionales por eléctricos es una solución parcial ya que no resuelve temas de congestión y es compleja ya que requiere desarrollo de infraestructura de carga y no es accesible ni sustentable para todos.

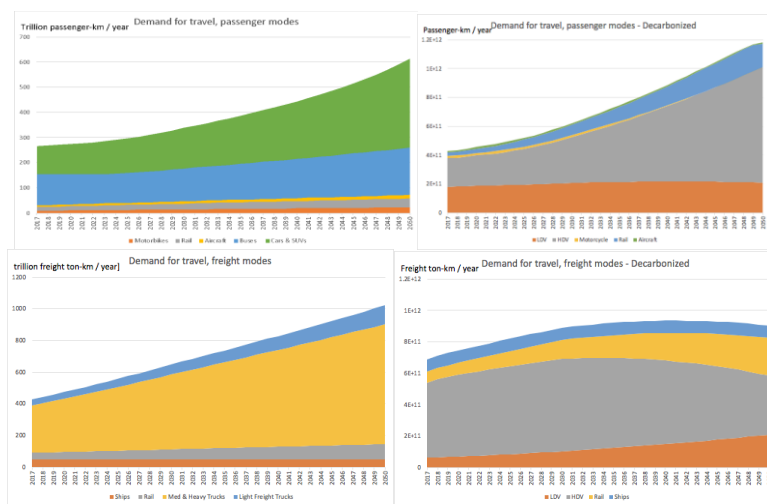
Mejorar el transporte de carga puede tomar muchas formas, entre ellas el desplazamiento de carga pesada en pelotones que mejoren la eficiencia en carretera (platooning), consolidación de envíos, medidas de eficiencia de última milla y calendarización de entregas. El desarrollo de sistemas logísticos abiertos y globales que integren información compleja en tiempo real, podrían traer mejoras de eficiencia a nivel sistema de hasta 20% (IEA, 2017).

## 5.2 Escenario tendencial y de descarbonización del sector transporte

Este análisis utilizó el modelo **Soluciones de Política Energética para México** (EPS México) (WRI, 2020). El EPS es un modelo de equilibrio dinámico que estima las emisiones de la actividad económica nacional entre 2017 y 2050. Se desarrolló un escenario de referencia **T1**, que mantiene las tendencias actuales del sector transporte y prospectiva oficial a escala nacional. El escenario de descarbonización **T2**, modifica el escenario de referencia simulando el impacto de medidas de mitigación que permiten una reducción de emisiones de GEI para cumplir con el presupuesto de carbono asignado al sector.

El escenario tendencial **T1** estima que el transporte pasajero crece al 3.6% anual entre 2017 a 2050, el cual está dominado por el transporte carretero individual que en 2017 representa 42% de la distancia recorrida y alcanzaría el 58% en 2050 (ver **Figura 22**). El transporte de carga tiene un crecimiento anual sostenido de 2.7% entre 2017 a 2050 y están dominados por camiones medianos y pesados con el 70% de todos los kilómetros recorridos por tonelada de carga.

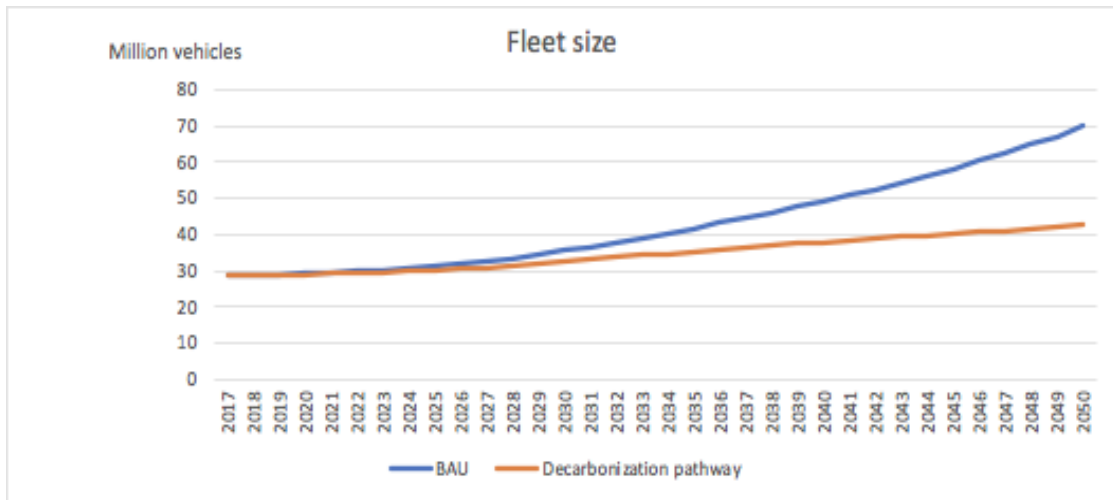
**Figura 22.** Demanda de modos de viaje, pasajeros y carga.



Fuente: EPS México, 2020.

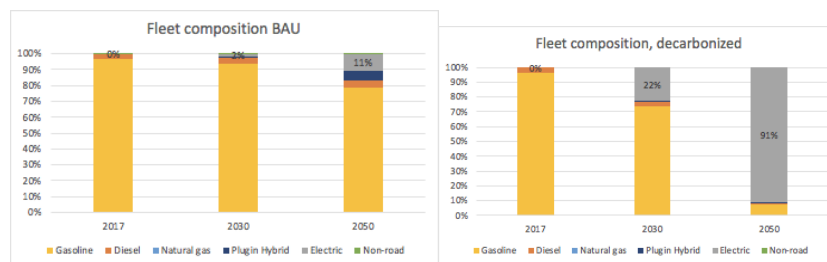
En cuanto al tamaño de la flota, los vehículos ligeros representan el mayor número con 26 millones en 2017. En T1 alcanzarán los 64 millones en 2050 con un crecimiento de 2.4 millones al año. El parque de motocicletas se duplica de 2 a 4 millones y los vehículos pesados y aviones crecen a una tasa similar de 1.6% anual. La aplicación de estrategias para evitar viajes tiene un impacto en el tamaño y composición de flota. El escenario con políticas de descarbonización tiene una flota 8% menor al 2030 y hasta 40% menor al 2050, equivalente a 27 millones de vehículos, cifra que rebasa 1 millón de vehículos comparada con la actual flota vehicular (ver **Figura 23**).

**Figura 23.** Tamaño de la flota



En cuanto a la composición de la flota, en el escenario tendencial los vehículos de gasolina dominan todo el horizonte de planeación con 96% de la flota en 2017 y 94% para 2030. La penetración de vehículos híbridos y eléctricos alcanza un 2.8% al 2030 y hasta 18% al 2050. Como resultado de la implementación de políticas estrictas de electrificación vehicular, la penetración de vehículos híbridos y eléctricos en el escenario **T2** alcanzan 23% de la flota en 2030 y hasta 91% en 2050 (ver **Figura 24**).

**Figura 24.** Tecnología de combustible, escenario tendencial (T1)

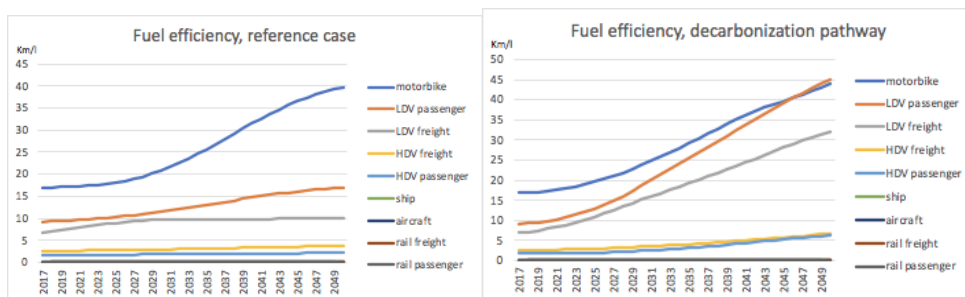


Fuente: EPS México, 2020.

Con respecto a la eficiencia energética, la aplicación de normatividad de eficiencia energética y emisiones vehiculares en **T2** con respecto al escenario de referencia logra incrementar la eficiencia en un 10-15% promedio en modos no-carreteros. Además, el efecto combinado de penetración de vehículos de bajas emisiones y la salida de los vehículos más viejos y contaminantes en **T2** aumenta la eficiencia del transporte carretero a más del doble (ver **Figura 25**).



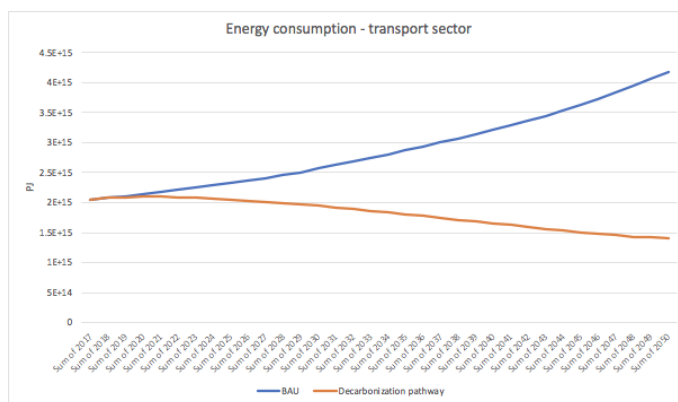
**Figura 25.** Eficiencia vehicular



Fuente: EPS México, 2020.

La aplicación de las políticas para evitar, desplazar y mejorar los traslados resulta en una reducción de la demanda energética del sector del 66% (ver **Figura 26**).

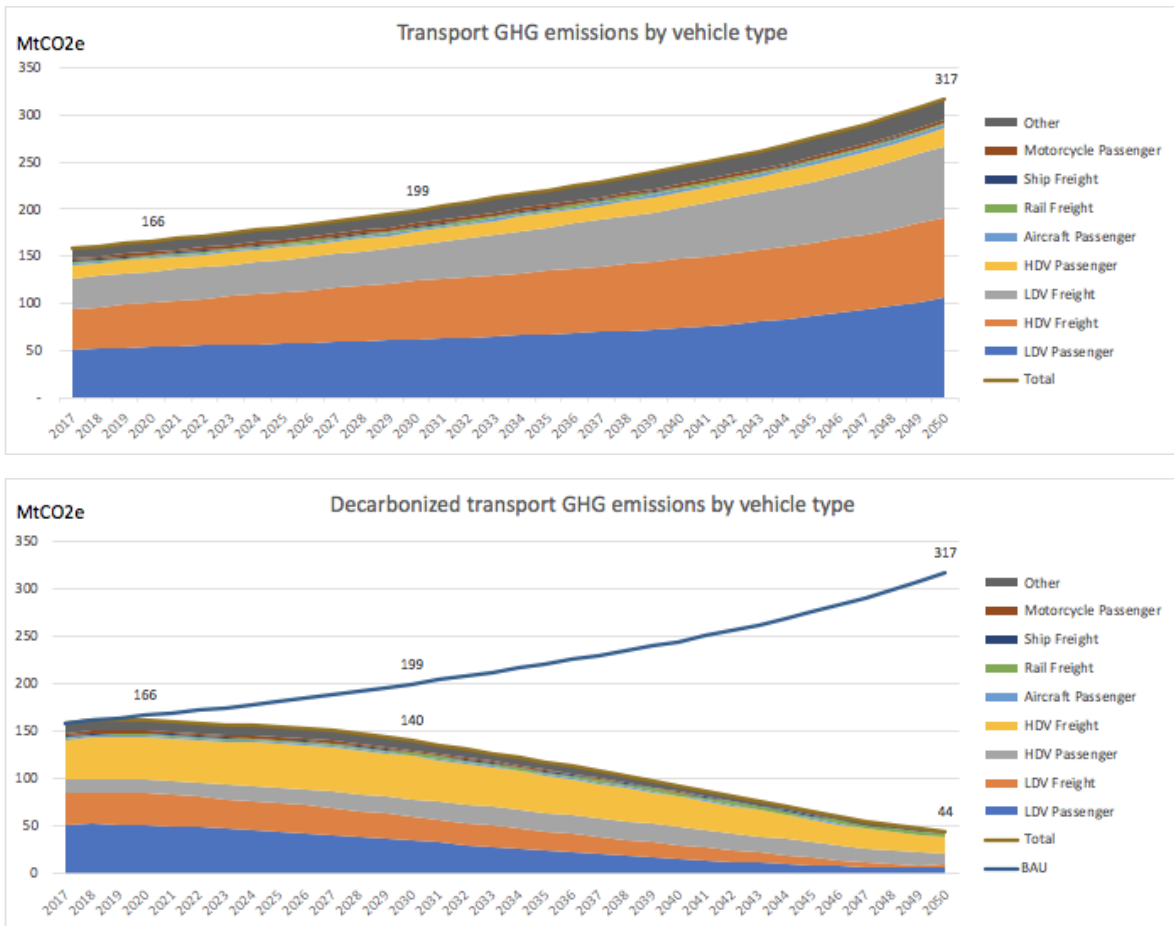
**Figura 26.** Consumo energético del sector transporte



Fuente: EPS México, 2020.

El escenario tendencial proyecta un aumento en las emisiones de GEI de 166 MtCO<sub>2e</sub> en el 2017 a 317 MtCO<sub>2e</sub> para el 2050, lo cual representaría un incremento en la contribución del sector transporte en el total de emisiones nacionales del actual 21% a 24% al final del periodo. La tasa de crecimiento anual de emisiones del sector presentaría un aumento del 1.8% para el periodo 2020-2030 y del 2.4% para 2030-2050. El escenario con acciones de descarbonización, logran abatir las emisiones de 317 MtCO<sub>2e</sub> a 44 MtCO<sub>2e</sub> en 2050. (ver **Figura 27**).

Figura 27. Emisiones del sector transporte por tipo de vehículo.



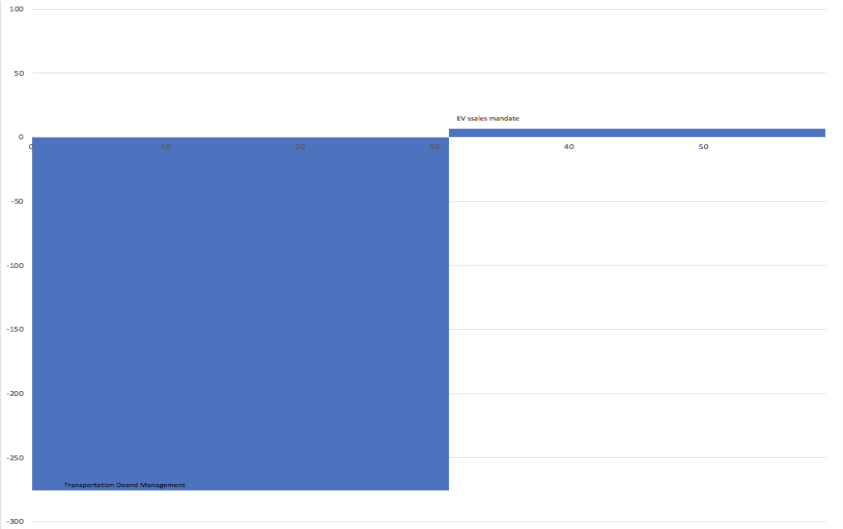
Fuente: EPS México, 2020.

En el escenario de descarbonización reduciría a 3.9 GtCO<sub>2</sub>e las emisiones acumuladas para el periodo 2019-2050, lo cual presenta una mitigación 47% con respecto al escenario tendencial (7.5 GtCO<sub>2</sub>e). No obstante, aún en el escenario de descarbonización, la permanencia de flota y viajes en vehículos con combustibles fósiles durante las siguientes tres décadas haría que se superen en más del doble el presupuesto de carbono del sector de 1.5 °C (1.5 GtCO<sub>2</sub>e). Estos resultados muestran la necesidad de promover medidas ambiciosas para acelerar el tránsito hacia modelos de bajas emisiones.

La estimación de la curva de costo marginal de abatimiento (MACC, por sus siglas en inglés) muestra que las medidas de mitigación del escenario de descarbonización tienen un potencial total de reducción anual de 60 MtCO<sub>2</sub>e para el 2030 con respecto al escenario de referencia. Como se muestra en la **Figura 28**, el manejo de la demanda de transporte que podría representar 30 MtCO<sub>2</sub>e al 2030, la cual mantendría su aportación a lo largo del horizonte de planeación. En esta área se incluyen medidas que van desde la promoción y desarrollo de la movilidad activa y transporte masivo urbano, hasta una menor demanda de traslado de carga y

usando modos de transporte de bajo carbono como trenes. La normatividad de eficiencia energética y emisiones vehiculares pueden abatir 2 MtCO<sub>2e</sub> en 2030 debido a la dificultad en la implementación observada históricamente en el área. No obstante, la normatividad es crítica para la descarbonización del sector y podría representar hasta 150 MtCO<sub>2e</sub> al 2050. Aunque la electrificación vehicular inducida podría abatir 28 MtCO<sub>2e</sub> al 2030 y hasta 99 MtCO<sub>2e</sub> al 2050, esta medida puede representar gastos significativos en comparación con el manejo de la demanda de transporte y las medidas normativas. Por lo tanto, una planeación integral de transporte nacional y movilidad urbana es prioritaria para reducir la demanda de traslados y desplazar los traslados a modos de transporte de bajas emisiones y movilidad activa antes de invertir en soluciones tecnológicas de transporte individual.

**Figura 28.** Curva de costos marginales de abatimiento al 2030.



Fuente: EPS México, 2020.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

La Ley General de Cambio Climático establece que uno de los objetos de la política climática debe ser el regular las emisiones GEI para que el país contribuya a lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera, a un nivel que impida un aumento mayor de la temperatura de la tierra más allá de lo previsto por las metas de largo plazo del Acuerdo de París. La Ley mandata que se deben establecer las bases para que México contribuya a ello.

Estas bases deben expresarse a través de una planeación clara y la definición de los medios de implementación. Uno de los instrumentos de planeación es la Estrategia Nacional de Cambio Climático, la cual debe reflejar los objetivos y ambición de las políticas de mitigación. Esto incluye acciones y metas intermedias de corto y mediano plazo al 2050, diferenciadas por fuente emisora y/o sector emisor, con una hoja de ruta para asegurar su cumplimiento.

Los resultados de este proyecto proporcionan elementos de referencia para entender y atender dos necesidades técnicas que el cumplimiento de la Ley requiere: **1)** identifica las implicaciones a nivel país de un escenario de 2°C y 1.5°C en términos de las emisiones remanentes; y dentro de éstas **2)** la trayectoria para cada sector, su comportamiento y las principales acciones de mitigación a considerar para cumplir el mandato de Ley y el compromiso adquirido en el Acuerdo de París.

Este análisis ofrece a nivel técnico una metodología alternativa para establecer objetivos de mitigación con base en el concepto de presupuestos de carbono. Los presupuestos de carbono, como escenarios de referencia, han tenido una amplia implementación en estudios internacionales y han orientado el diseño y planeación de políticas climáticas en países como Reino Unido. Por lo tanto, la metodología propuesta en este estudio complementa los esfuerzos de planeación existentes en México y busca aportar insumos de información para la futura investigación en los retos de la descarbonización. Además, el análisis de costos complementa la perspectiva técnica y permite identificar aquellas acciones en cada sector que resultan con mayor beneficio y menor costo.

### Las principales conclusiones de este estudio son:

- México tiene un presupuesto de carbono limitado para contribuir a estabilizar las emisiones de GEI en línea con los objetivos de largo plazo del Acuerdo de París. Un reto de gran escala considerando que en el año 2015 las emisiones totalizaron 0.7 GtCO<sub>2e</sub>, de acuerdo con el Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015.

### Presupuesto de carbono para México

Periodo	Trayectoria 2°C (GtCO <sub>2e</sub> )	Trayectoria 1.5°C (GtCO <sub>2e</sub> )
2019-2100	22.2	8.89
2019-2050	0.561	0.356
2019-2030	0.45	0.147

- El presupuesto de carbón permitió establecer presupuestos de carbono sectoriales, y con base en estos, se examinó las rutas de descarbonización para los sectores eléctricos, industria del petróleo y gas y transporte al 2030 y 2050. Los análisis sectoriales demostraron que es posible mitigar las emisiones de estos, a un nivel acorde con el escenario de 1.5°C. El estudio también mostró que actualmente existen medidas que, con una planeación adecuada, pueden reducir sus emisiones, las cuales, como muestra este estudio son técnicamente factible, económicamente viable y pueden generar beneficios ambientales y sociales a nivel local, como la reducción en la contaminación del aire y de enfermedades respiratorias asociadas.
- La ruta de descarbonización examinada para el sector eléctrico podría reducir sus emisiones a 64 MtCO<sub>2e</sub> para el 2030, un nivel que se ajustaría al escenario de 1.5°C. Esta ruta requeriría *i)* duplicar la participación de las energías renovables en 2030 con respecto al escenario de desarrollo tendencial del sector; *ii)* el retiro de las centrales basadas en combustibles fósiles con mayor intensidad de emisiones de GEI (carbón y combustóleo); *iii)* una reducción en la participación de otras tecnologías basadas en combustibles fósiles como el ciclo combinado a gas natural. En el mediano plazo, la creación de un marco regulatorio y mecanismos de financiamiento que incentiven el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento y la generación distribuida puede incrementar la flexibilidad de la red y disminuir la inversión en infraestructura de transmisión y distribución. La ruta de descarbonización requeriría una capacidad instalada total de 11% superior al escenario tendencial debido a la alta penetración de energías renovables; las cuales, para el 2030, alcanzaría una generación de 277 TWh (aproximadamente 53.7% de la demanda). Aunque la ruta de descarbonización para el periodo 2019-2030 superaría únicamente en 5% los costos totales del escenario de desarrollo tendencial, la diferencia entre los costos de ambos escenarios se revertiría al considerar las externalidades positivas ambientales y sociales derivadas de la descarbonización.
- La ruta de descarbonización analizada para el sector industria de petróleo y gas tienen un potencial de reducción de emisiones total de 25,3 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> por año para el 2030. Un 57% de este potencial corresponde a medidas de mitigación rentables con beneficios económicos (ej., reducción de fugas de metano en las actividades de procesamiento de gas, eficiencia energética en los procesos de refinación de petróleo y la cogeneración), el cual podría incrementarse al 83% a través de mecanismos internacionales de financieros. Para el periodo 2030-2050, un posible agotamiento natural de los recursos petrolíferos convencionales puede reducir las emisiones de GEI. Sin embargo, los resultados de los distintos escenarios de desarrollo sectorial (con o sin la explotación de recursos no convencionales), muestran que es necesario mantener los recursos no convencionales sin quemar para alcanzar los objetivos de mitigación de mediano y largo plazo.
- La ruta de descarbonización examinada para el sector transporte tienen un potencial de mitigación de 210 MtCO<sub>2e</sub> anuales para el 2030 y hasta 309 MtCO<sub>2e</sub> para el 2050. A través de una estrategia de movilidad orientada a evitar los viajes de pasajeros y movilidad de carga; desplazar los viajes a modos de transporte sostenible y mejorar la eficiencia energética mediante la transición a combustibles más limpios; al 2030 y 2050 la flota vehicular es 8% y 40% menor y la penetración de vehículos eléctricos e híbridos alcanza

el 23% y 91% respectivamente. Se consigue también incrementar la eficiencia energética entre 10 y 15% en modos no carreteros y en más del doble en modos carreteros. Todo ello se traduce en una demanda energética del sector menor al 66% y en un abatimiento de emisiones GEI del 80%, ambos respecto al escenario de referencia. Las medidas analizadas ajustan las emisiones del sector al escenario de 2 ° C, pero superarían los requerimientos del escenario de 1.5° C. Estos resultados revelan la importancia de iniciar el proceso de desarmonización en el sector transporte para fortalecer las condiciones regulatorias e institucionales que permitan plantear una mitigación más ambiciosa en el mediano plazo.

El análisis presentado propone elementos para alimentar el diseño de la política climática en México alineada a los objetivos de largo plazo del Acuerdo de París, busca apoyar la toma de decisiones, y enriquecer el diseño e implementación de los mecanismos de implementación. Este esfuerzo se inspira no solo en la experiencia internacional, también en el reconocimiento de los diversos ejercicios y análisis que diversos actores públicos y de la sociedad civil en México han llevado a cabo para tal efecto.

El diseño de la política pública es un proceso -por definición- dinámico y flexible, que debe reconocer y adoptar las decisiones públicas a las necesidades más apremiantes, incluyendo el hacer frente al cambio climático y responder a la emergencia climática. En este sentido, este análisis debe ampliarse, discutirse, revisarse y actualizarse para que garantice su relevancia y vigencia. Por ejemplo, será necesario hacer el análisis de descarbonización para los sectores emisores restantes, como AFOLU y/o industria. También se requiere una revisión del análisis económico para incluir la incertidumbre financiera derivada de la crisis económica y sanitaria causada por el COVID-19. Los resultados de este estudio pueden ser robustecidos por un posterior análisis socioeconómico del impacto de las rutas de descarbonización que aporte orientaciones para vincular las medidas de mitigación a la muy relevante y prioritaria tarea de combate a la pobreza y las desigualdades en el país.

Finalmente, la colaboración entre sociedad civil y gobierno es fundamental para identificar los retos de la emergencia climática en México y la construcción de soluciones políticas que atiendan este fenómeno. Este análisis técnico se inscribe en este esfuerzo de colaboración al ofrecer elementos de referencia para el diseño de los instrumentos y decisiones climáticas, los cuales, quienes participamos en este estudio, esperamos que sea de la mayor utilidad.

## 7. Referencias

- Ayala-Chávez, R. (2014) El pico de petróleo y la transición energética en México; aplicación del modelo de Hubbert bajo condiciones actuales y con restricciones de cambio climático. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). MSc thesis.
- Ayala-Chávez, R. (2014) El pico de petróleo y la transición energética en México; aplicación del modelo de Hubbert bajo condiciones actuales y con restricciones de cambio climático. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). MSc thesis.
- CNH (2019a) Centro Nacional de Información de Hidrocarburos [On line] Available from: <https://hidrocarburos.gob.mx/> [Accessed: 2 December 2019].
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) e Iniciativa Climática de México (ICM), Presupuestos de carbono: Una oportunidad para ampliar la ambición climática del sector eléctrico. Ciudad de México, 17 de octubre de 2019.
- Fransen, T. et al. 2019 a. "Enhancing NDCs: A Guide to Strengthening National Climate Plans by 2020." Washington, DC and New York: WRI, United Nations Development Programme (UNDP), September. [https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/enhancing-ndcs\\_0.pdf](https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/enhancing-ndcs_0.pdf).
- Gignac, Renaud, and H. Damon Matthews. "Allocating a 2 C cumulative carbon budget to countries." *Environmental Research Letters* 10.7 (2015): 075004.
- Gillett, N. P., Arora, V. K., Matthews, D., & Allen, M. R. (2013). Constraining the ratio of global warming to cumulative CO2 emissions using CMIP5 simulations. *Journal of Climate*, 26(18), 6844-6858.
- Hubbert, M.K. (1956) Nuclear Energy and fossil fuels. *Drilling and Production practice*, 95, 1-40.
- IEA. 2017. "Energy Technology Perspectives (ETP) 2017." <https://webstore.iea.org/energy-technology-perspectives-2017>
- IIASA 2014, AR5 Scenario Database: Version 1.0.2., International Institute for Applied System Analysis, viewed 23 September 2019, <<https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB/sd?Action=htmlpage&page=about#references>>
- IIASA 2018, SSP Public Database: Version 2.0, International Institute for Applied System Analysis, viewed 23 September 2019, <<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=10>>

- IPCC. (2018). *IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Knutti, Reto, and Joeri Rogelj. "The legacy of our CO<sub>2</sub> emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics." *Climatic Change* 133.3 (2015): 361-373.
- O'Neill, K. (2017). *The environment and international relations*. Cambridge University Press.
- Hale, T. (2016). "All hands on deck": The Paris agreement and non-state climate action. *Global Environmental Politics*, 16(3), 12-22.
- PEMEX (2010) Informe de Responsabilidad Social 2010. México: Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- PEMEX (2012a) Plan Rector para el Manejo Integral del Gas de la Región Marina Noreste 2012 – 2016, México: Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- PEMEX (2014) Newsletter No. 3 "Round Zero Resolution & Round One Updates" [On line] Available from:  
<http://www.ri.pemex.com/files/content/No.%203%20Round%200%20&%20Round%201.pdf> [Accessed: 19 November 2019].
- PEMEX (2015) Informe de Sustentabilidad 2015. México: Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- PEMEX (2017) *Informe anual*. México: Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- PEMEX (2018) Informe de Sustentabilidad 2018. México: Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- PEMEX (2019a) Plan de Negocios de Petróleos Mexicanos y sus Empresas Productivas Subsidiarias 2019 – 2023. México: Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- Rogelj, Joeri, et al. "Zero emission targets as long-term global goals for climate protection." *Environmental Research Letters* 10.10 (2015): 105007.
- SEMARNAT (2017), Sexta Comunicación Nacional ante la CMNUCC,  
<https://www.gob.mx/inecc/articulos/sexta-comunicacion-nacional-ante-la-cmnucc?idiom=es> [December 4, 2018]
- SENER (2018) Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018 – 2032. México: Secretaría de Energía.
- SENER (2019) Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2019 – 2033. México: Secretaría de Energía.
- Towler, B. (2014) The future of oil and Hubbert's peak oil theory. *Peak Oil Theory*.
- WRI (2019), Choosing the Right Path Low-Cost Policy Options for Enhancing Mexico's Climate Goals While Achieving Long-Term Social Benefits. EUA.  
<https://www.wri.org/publication/choosing-right-path>