



Costos y beneficios de lograr la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

Nidhi Kalra
Edmundo Molina-Perez
James Syme
Fernando Esteves
Hermilo Cortés
Mateo Tonatiuh Rodríguez-Cervantes
Víctor Manuel Espinoza-Juárez
Marcela Jaramillo
Richard Baron
Claudio Alatorre
Marco Buttazzoni
Adrien Vogt-Schilb



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Costos y beneficios de lograr la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe / Nidhi Kalra, Edmundo Molina-Perez, James Syme, Fernando Esteves, Hermilo Cortés, Mateo Tonatiuh Rodríguez-Cervantes, Víctor Manuel Espinoza-Juárez, Marcela Jaramillo, Claudio Alatorre, Marco Buttazzoni, Adrien Vogt-Schilb.

p. cm. — (Monografía del BID; 1159)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climate change mitigation-Latin America. 2. Climate change mitigation-Caribbean Area. 3. Carbon dioxide mitigation-Latin America. 4. Carbon dioxide mitigation-Caribbean Area. 5. Sustainable development-Latin America. 6. Sustainable development-Caribbean Area. 7. Greenhouse gas mitigation-Latin America. 8. Greenhouse gas mitigation-Caribbean Area. I. Kalra, Nidhi. II. Molina-Perez, Edmundo. III. Syme, James (James C.). IV. Esteves, Fernando. V. Cortés, Emilio. VI. Rodríguez-Cervantes, Mateo Tonatiuh. VII. Espinoza-Juárez, Víctor Manuel. VIII. Jaramillo, Marcela. IX. Alatorre, Claudio. X. Buttazzoni, Marco. XI. Vogt-Schilb, Adrien. XII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. XIII. Serie.

IDB-MG-1159

Palabras clave: descarbonización, estrategias de largo plazo, mitigación del cambio climático, NDC

Códigos JEL: Q01, Q54, Q56, O13, O44

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



En la COP28, se espera que los países anuncien planes de reducción de emisiones de largo plazo más ambiciosos, en términos de sus objetivos de largo plazo, composición sectorial o medios de implementación. Este informe nuevo y oportuno puede contribuir a los esfuerzos de los países en este sentido. En lugar de reiterar los importantes mensajes del IPCC sobre la capacidad del mundo para alcanzar la carbono-neutralidad y limitar el calentamiento a 1,5°C, este trabajo aporta un enfoque pragmático y convincente para analizar las opciones tecnológicas y de política pública prácticas a nivel nacional.

El objetivo de SiSePuede es facilitar los debates con los distintos responsables de la toma de decisiones a nivel nacional y subnacional, expresando las reducciones de emisiones en términos de acciones tangibles en sus sectores y métricas que los actores sectoriales puedan comprender fácilmente. También proporciona estimaciones sólidas de los llamados "co-beneficios" de estas transformaciones en toda la sociedad.

Como actor y observador de las estrategias climáticas a largo plazo, la 2050 Pathways Platform se enfrenta con frecuencia al reto de explicar la relevancia de su trabajo. ¿Cómo puede una visión de largo plazo para 2050 o 2060, con todas sus incertidumbres inherentes, informar útilmente las decisiones de hoy? Una forma de afrontar este reto es reconocer las grandes incertidumbres y poner a prueba la solidez de las opciones para

reducir las emisiones y avanzar al mismo tiempo hacia los objetivos de desarrollo frente a los cambios impredecibles que se avecinan. Ése es exactamente el enfoque adoptado en este informe.

Al dar vida a los resultados a nivel sectorial en métricas que utilizan los responsables de la toma de decisiones -como las toneladas de clínker para los fabricantes de cemento, los valores de los servicios ecosistémicos para las autoridades forestales o los costos para las empresas eléctricas-, este enfoque puede ayudar a que las estrategias de descarbonización de los países sean totalmente aceptables para quienes deben aplicarlas.

Dado que muchas naciones más allá de América Latina y el Caribe todavía tienen que diseñar estrategias climáticas sólidas a largo plazo, espero que este enfoque innovador se extienda más ampliamente. Los avances que aquí se presentan son muy importantes si queremos que nuestras economías y sociedades transiten rápidamente hacia un futuro de cero emisiones netas de una forma que sea equitativa, resiliente y que no deje a nadie atrás.



Richard Baron
Director Ejecutivo
2050 Pathways Platform

Los países de América Latina y el Caribe están trazando sus caminos hacia la carbono-neutralidad y el desarrollo resiliente al cambio climático. Este informe ofrece ideas sobre cómo los gobiernos pueden acelerar el progreso climático a la vez que avanzan en objetivos económicos y sociales más amplios.

El cambio climático plantea graves amenazas y tenemos que responder a ellas. Al mismo tiempo, la revolución tecnológica mundial hacia las energías renovables, la electromovilidad y el uso sostenible de la tierra presenta nuevas oportunidades para un crecimiento económico sostenible y una vida mejor. Varios países se han embarcado en viajes transformadores, como demuestra la implementación de estrategias a largo plazo e intersectoriales alineadas con el Acuerdo de París. Otros países están empezando a identificar y aplicar reformas sectoriales que señalan el camino a seguir.

El trabajo presentado en este informe demuestra que la transición hacia las cero emisiones netas en América Latina y el Caribe conferirá beneficios económicos sustanciales, por ejemplo, la reducción de costos de energía, el aumento de la productividad y la mejora de la salud pública. En este sentido, este estudio confirma lo que los estudios de países han encontrado antes; pero estima por primera vez el tamaño de los beneficios económicos, que podrían ascender a 2,7 billones de dólares de beneficios netos de aquí a 2050.

Más allá de las cifras, el estudio ofrece un marco exhaustivo, riguroso y transparente para evaluar las opciones de descarbonización. El trabajo que aquí se presenta sigue los más altos estándares técnicos. Refleja los resultados de una amplia consulta con expertos del Grupo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), nuestros socios de la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD) y la 2050 Pathways Platform. La plataforma de modelización de código abierto resultado de este trabajo permite a las partes interesadas evaluar los costos, beneficios e incertidumbres vinculados a las opciones de

desarrollo.

Los procesos participativos y la modelización utilizados en este estudio estiman lo que los países pueden y deben hacer para planificar la descarbonización de forma que responda a las prioridades y capacidades locales. Este informe señala los beneficios de la acción climática y de iniciar el proceso de transformación tecnológica verde. El estudio confirma el papel fundamental que, para alcanzar las cero emisiones netas, tienen las energías renovables, la electrificación de los usos energéticos, sobre todo en el transporte, y la gestión integrada de la producción de alimentos y la biodiversidad.

La transformación no será fácil: requerirá alinear el financiamiento, el liderazgo y la gobernanza para gestionar la intrincada red de ganadores y perdedores. Los gobiernos deben desarrollar y comunicar visiones claras, diagnosticar y abordar sistemáticamente las barreras al cambio y alinear el financiamiento necesario para realizar inversiones críticas.

A medida que se intensifican los impactos climáticos y se acelera la transformación ecológica mundial, el tiempo es esencial. Conseguir un futuro justo, equitativo y próspero con la carbono-neutralidad es posible, pero los países deben actuar con rapidez y sensatez. Como la mayor fuente de financiación climática y de desarrollo para América Latina y el Caribe, el Grupo BID puede ayudar a planificar y cambiar las políticas con conocimientos y asistencia técnica, al tiempo que proporciona financiamiento para las inversiones críticas necesarias para impulsar la transformación en los países.



Graham Watkins
Jefe de la División de Cambio Climático
Banco Interamericano de Desarrollo

Acerca de este informe de investigación

Sequías, inundaciones, incendios forestales y otras catástrofes relacionadas con el cambio climático se están produciendo en todo el planeta y están destrozando vidas, arrasando economías y dejando a su paso una destrucción que muchos esperaban que no ocurriría sino hasta dentro de varias décadas. Sin embargo, aún no es demasiado tarde para evitar los peores efectos negativos del cambio climático. Limitar el aumento de la temperatura a 1,5-2°C por encima de los niveles preindustriales, en consonancia con el Acuerdo de París, requiere alcanzar cero emisiones netas de gases de efecto invernadero en torno a 2050. Esto, a su vez, requiere transformaciones en todos los sectores de la economía. Afortunadamente, muchas transformaciones que ayudarían a alcanzar los objetivos climáticos suelen venir acompañadas de enormes beneficios económicos y de desarrollo que se alinean directamente con los objetivos de los gobiernos y sectores que las aplicarán.

Este informe toma como base los estudios realizados en Chile, Costa Rica, Colombia, República Dominicana y Perú (Benavides et al., 2021; Groves et al., 2020; Arguello et al., 2022; Quirós-Tortos et al., 2023; Quirós-Tortos et al., 2021) que conectan los objetivos de desarrollo y descarbonización identificando y cuantificando los costos y beneficios sociales, económicos y medioambientales de las acciones que ayudarían a los países a alcanzar la carbono-neutralidad. Este trabajo presenta SiSePuede, un conjunto de herramientas para desarrollar y evaluar transformaciones económicas, y diseñar estrategias robustas de descarbonización para toda América Latina y el Caribe, al tiempo que profundiza en las implicaciones para cada sector y país en la región.

Este trabajo es fruto de la colaboración entre la RAND Corporation, el Tecnológico de Monterrey, el BID y la 2050 Pathways Platform. Ha sido financiado por el BID y la Fundación Europea del Clima. El contenido de este trabajo refleja el análisis de los autores y no representa necesariamente los puntos de vista y opiniones de las organizaciones financiadoras.

Aquí, nos esforzamos por desmitificar la idea de la imposibilidad de alcanzar la carbono-neutralidad y conectar el cambio climático con los objetivos y preocupaciones de muchas personas en toda la economía que implementarán cambios necesarios. Esperamos que este informe sea de interés para los ministerios de clima, finanzas, ministerios sectoriales y para los líderes del sector privado en toda América Latina, el Caribe y más allá. Esperamos también que los resultados mostrados en este reporte tengan resonancia con las organizaciones financieras internacionales y otras organizaciones no gubernamentales (ONG) que están buscando acelerar las acciones para mitigar el cambio climático, así como con los responsables de las políticas climáticas de todo el mundo.

Acerca del bienestar social y económico de RAND

RAND Social and Economic Well-Being es una división de RAND Corporation que busca mejorar la salud y el bienestar social y económico de poblaciones y comunidades de todo el mundo. Esta investigación se llevó a cabo en el Programa de Salud Comunitaria y Política Medioambiental dentro de RAND Social and Economic Well-Being. El programa se centra en temas como las infraestructuras, la ciencia y la tecnología, la política industrial, el diseño comunitario, la promoción de la salud comunitaria, la migración y la dinámica de la población, el

transporte, la energía y el clima y el medio ambiente, así como otras preocupaciones de política pública relacionadas con el entorno natural y construido, la tecnología y las organizaciones e instituciones comunitarias que afectan al bienestar. Para más información, envíe un correo electrónico a chep@rand.org.

Acerca del Tecnológico de Monterrey

El Tecnológico de Monterrey es la universidad privada más grande de México, con 31 campus en 25 ciudades. Es una institución privada, sin fines de lucro, independiente y sin afiliaciones políticas o religiosas. Desde 2018, el Quacquarelli Symonds World University Rankings reconoce al Tecnológico de Monterrey como la mejor universidad privada de México, y en 2021 entre las 30 mejores universidades privadas del mundo. Su labor está respaldada por asociaciones civiles de líderes de todo México comprometidos con la calidad de la educación superior. Los programas de investigación incluyen alianzas estratégicas con el Instituto Tecnológico de Massachusetts, el Centro de Biotecnología Femsa, el Centro del Agua para América Latina y el Caribe (financiado por el BID y la Fundación Femsa), el Centro de Investigación y Desarrollo en Movilidad Doméstica y Redes de Motorola, el Centro de Diseño Avanzado del Campus Guadalajara, y la Escuela de Gobierno y Transformación Pública Redes de Conocimiento en Energía financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conacyt). Para más información, envíe un correo electrónico a eduardo.molina@tec.mx.

Acerca del Banco Interamericano de Desarrollo

El BID es una fuente líder de financiación a largo plazo para proyectos económicos, sociales e institucionales en América Latina y el Caribe. Además de préstamos, donaciones y garantías, el BID lleva a cabo investigación de vanguardia para ofrecer soluciones innovadoras y sostenibles a los retos más acuciantes de la región. Fundado en 1959 para ayudar a acelerar el progreso de sus países miembros en desarrollo, el BID trabaja cada día para mejorar vidas. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del BID, de su Junta Directiva o de los países a los que representan.

Acerca de la Plataforma Sendas 2050

La 2050 Pathways Platform es una iniciativa multilateral lanzada en 2016 por la Embajadora de Francia para el Cambio Climático en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), Laurence Tubiana, una de las artífices del Acuerdo de París. Se creó a petición de los países que deseaban disponer de un espacio colectivo para intercambiar las mejores prácticas para la elaboración de estrategias de desarrollo a largo plazo con bajas emisiones, uno de los elementos clave del Acuerdo de París. Además de sus 38 países miembros, la Plataforma reúne a una red de donantes bilaterales y multilaterales, grupos de reflexión internacionales y nacionales y expertos en política climática interesados en la planificación a largo plazo como respuesta al desafío climático.

Agradecimientos

Damos las gracias a los numerosos expertos en la materia del BID y la AFD que ofrecieron su experiencia en nuestros talleres y cuyos comentarios guiaron nuestra metodología de investigación, los datos y las conclusiones. Agradecemos especialmente las revisiones escritas de Karla Arias, Hector Baldivieso, Lenin Balza, Allen Blackman, Carlos Beltrán, Agustina Calatayud, Magda Correal, Isaura Espinosa de los Monteros, Christiaan Gischler, Jose Irigoyen, Nora Lambrecht, Benoit Lefevre, Luisa Fernanda Lema Velez, Nora Libertun de Duren, Natacha Marzolf, Pedro Martel, Juan Roberto Paredes, Katia Queiroz Fenyves, Maria Perez-Urdiales, Juan Alfredo Rihm Silva, Camila Rodriguez Taylor, Lina Salazar, Malini Samtani, Jose Antonio Urteaga, y Niels van Eybergen en el BID, y Richard Baron en 2050 Pathways. Agradecemos sinceramente a Yessica Zeltzin Orozco Armenta, María Esperanza Plaza Ferreira y Robin Eriksson su continuo apoyo en la codificación. También damos las gracias a nuestros revisores formales, David G. Groves del Banco Mundial y Michelle Miro de RAND Corporation, por sus excelentes comentarios y su continua orientación.

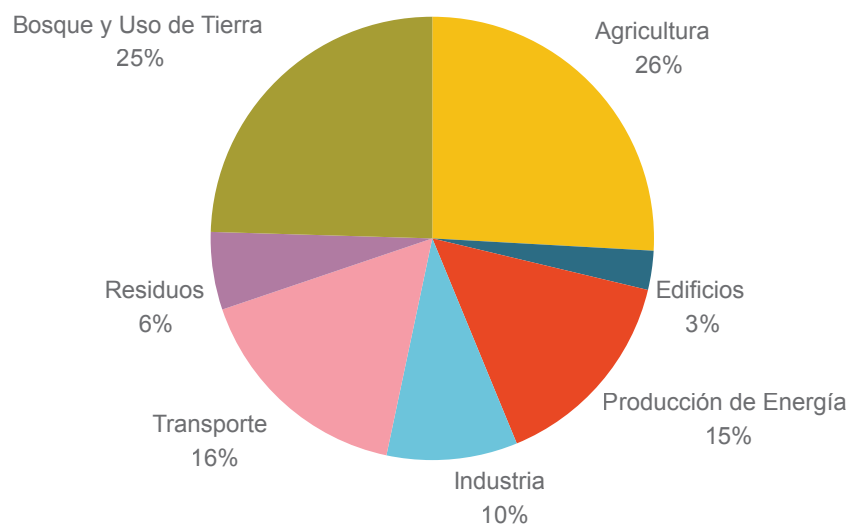
Verónica Corona es la diseñadora gráfica de este informe. Tammi Titsworth es la editora.

Resumen ejecutivo

El cambio climático supone una grave amenaza para el desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe (Talbot-Wright y Vogt-Schilb, 2023). Sus efectos negativos incluyen desastres naturales más frecuentes e intensos, aumento del nivel del mar, cambios en los patrones climáticos locales y pérdida de servicios vitales de los ecosistemas. Las repercusiones para los seres humanos son enormes, incluidas las amenazas a la seguridad alimentaria y del agua, los daños a la infraestructura, el aumento de la morbilidad y la mortalidad humanas, y la disminución de la productividad laboral, los ingresos de los hogares, los ingresos fiscales y los ingresos del turismo. Además, el cambio climático afecta de forma desproporcionada a las personas pobres y con escasa representación, creando un círculo vicioso. También es posible que el cambio climático incremente el número de poblaciones desplazadas, tanto dentro como fuera de las fronteras nacionales. La vulnerabilidad de las poblaciones urbanas y de los pequeños estados insulares es especialmente preocupante. Aunque la adaptación es esencial y urgente, está resultando inadecuada frente al cambio climático fuera de control (Parmesan et al., 2022).

El calentamiento global seguirá empeorando a medida que el mundo emita gases de efecto invernadero (GEI). Para limitar el aumento de la temperatura entre 1,5 y 2°C por encima de los niveles preindustriales, el objetivo global del Acuerdo de París exige alcanzar las cero emisiones netas de GEI en torno a 2050 (Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2015). Este ambicioso objetivo requiere cambios masivos en todos los sectores de la economía y en todos los países (BID y DDPLAC, 2019; Fazekas et al., 2022). Cumplir tanto los objetivos de resiliencia como los de descarbonización requiere realinear el equivalente del 7 al 19% del producto interior bruto (PIB) con los objetivos del cambio climático cada año (Galindo Paliza et al., 2022).

Una cuestión clave es cuánto deben hacer los países de América Latina y el Caribe para reducir las emisiones. Las emisiones en la región alcanzaron una media de 4 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO₂e) al año entre 2015 y 2020 (Climate Watch Historical GHG Emissions, 2022). La figura ES.1 muestra el desglose de las emisiones en la región por sectores económicos. La agricultura, los bosques y otros usos de la tierra representan el 50% de las emisiones, lo que refleja el gran papel que desempeña la agricultura en la región, que es exportadora neta de productos agrícolas, así como la rápida deforestación que ha acompañado a la expansión de la agricultura en general y a la conversión de bosques en pastizales en particular (Climate Watch Historical GHG Emissions, 2022; Hernández-Blanco et al., 2020, Zalles et al., 2021). La producción de electricidad y energía, por otro lado, contribuye mucho menos a las emisiones en gran parte debido a la importante dependencia de la región de la energía hidroeléctrica, aunque la creciente dependencia del gas natural para la electricidad es un importante impulsor de las emisiones (Marinkovic, 2023; Vogt-Schilb, 2023). Esto contrasta con el resto del mundo, en el que la agricultura, los bosques y otros usos del suelo representan el 15% de las emisiones y la producción de electricidad y energía el 40% (Climate Watch Historical GHG Emissions, 2022).



Fuente: Climate Watch, Instituto de Recursos Mundiales (2023).

Figura ES.1 Emisiones por sector en América Latina y el Caribe (2015-2020).

Las emisiones de la región representan menos del 10% del total de las emisiones mundiales de 47,5 Gt de CO₂e (Climate Watch Historical GHG Emissions. 2022). Por ello, muchos proponen que la mayor parte de las reducciones de emisiones se produzcan en los países desarrollados, que ya se han beneficiado de las economías basadas en los combustibles fósiles y cuyas emisiones son mucho mayores. A los países más pobres, mientras tanto, se les debería dar margen para desarrollarse como les parezca, quizá contaminando en el proceso (Vogt-Schilb, 2023).

Sin embargo, los patrones tradicionales de desarrollo en todo el mundo, incluida América Latina y el Caribe, han distado mucho de ser óptimos. Cada vez hay más pruebas de que el desarrollo y la descarbonización pueden estar más alineados que contrapuestos (Fazekas et al., 2022). Por ejemplo, el crecimiento económico de la región ha dado lugar al aumento más rápido de la propiedad de automóviles del mundo (SLOCAT 2021). Aunque esto ha aportado oportunidades económicas y un alto nivel de vida a millones de personas, también supone enormes costos resultado de los accidentes, la congestión de las carreteras y la contaminación atmosférica (Calatayud et al., 2021; Chen et al., 2019; Husaini et al., 2022). Las políticas públicas y las inversiones que promueven el transporte no motorizado, una mayor ocupación de los vehículos, una mayor eficiencia de los vehículos y los vehículos electrificados podrían mejorar la calidad de vida y promover el crecimiento, reduciendo al mismo tiempo las emisiones. En otro rubro, muchos habitantes de la región carecen de acceso a agua potable y saneamiento. Alcanzar el agua potable y el saneamiento universal no sólo es un Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) clave, sino que la recolección, la gestión segura, el tratamiento y la recuperación energética de los residuos y las aguas residuales son fundamentales para reducir las emisiones (Rani et al., 2022; de Foy et al., 2023).

Además, el costo de las tecnologías con bajas emisiones de carbono, como la solar y la eólica, se ha desplomado (AIE, 2023). Las tecnologías que funcionan con electricidad, como los vehículos eléctricos o las bombas de calor, suelen ser más baratas de operar y de mantener que sus homólogas basadas en combustibles fósiles, aunque la financiación de los elevados costos iniciales sigue siendo un reto (Rissman, 2022; AAA, 2019; Burke et al. 2022). En algunos sectores, la descarbonización se está convirtiendo en la forma más rápida de reducir costos y mejorar la confiabilidad de los servicios.

De hecho, investigaciones previas a nivel nacional han descubierto que alcanzar la carbono-neutralidad podría suponer beneficios netos de aproximadamente 41,000 millones de dólares en Costa Rica, 7,000 millones en Chile, 330,000 millones en Colombia y 140,000 millones en Perú (Groves et al., 2020; Benavides et al., 2021; Arguello et al., 2022; Quirós-Tortos et al., 2021). Los estudios regionales han sugerido que los esfuerzos de descarbonización pueden aumentar el PIB en América Latina y el Caribe en un 1% para 2030 (Vogt-Schilb, 2021), al tiempo que crean millones de empleos verdes (Saget et al., 2020).

Incluso si la reducción de las emisiones contribuye al desarrollo, es fácil que los planes de descarbonización se sientan desconectados de los objetivos, los conocimientos y el contexto de los ciudadanos de a pie y de los responsables de la toma de decisiones que deben ponerlos en práctica. Los ministerios de medio ambiente de los gobiernos suelen ser los responsables de diseñar las estrategias climáticas. Pero las acciones descritas en estos planes deben ser aplicadas por el sector privado; por organismos gubernamentales de otros ministerios como los de transporte, energía, agricultura, industria y finanzas; y por varios niveles de gobierno, desde el nacional hasta el municipal (Rakes et al., 2023; Vera et al., 2023). Puede que estos actores simpaticen con el cambio climático, pero tienen otras prioridades -como el crecimiento, la productividad y los salarios, y preocupaciones sectoriales específicas como la congestión, los costos sanitarios y la seguridad alimentaria- y poco conocimiento de lo que significa para ellos la carbono-neutralidad y cómo alcanzar estos objetivos. Para estar motivados y poder actuar, los agricultores, las autoridades de tránsito o los actores industriales, que hablan en términos de cabezas de ganado, número de autobuses y toneladas de cemento, necesitan saber qué transformaciones específicas son necesarias en su sector para avanzar hacia el objetivo de emisiones netas cero, y cuáles serían los costos y beneficios de esas transformaciones.

Objetivo y enfoque

En este estudio, exploramos las opciones para que América Latina y el Caribe cumplan con solidez dos objetivos: alcanzar las cero emisiones netas en consonancia con los objetivos del Acuerdo de París y proporcionar beneficios sociales, económicos y medioambientales netos a los países que cumplan con esa ambición.

Para este efecto hemos desarrollado SiSePuede (SIMulation of SEctoral Pathways and Uncertainty Exploration for DEarbonization), un marco de referencia para diseñar estrategias de desarrollo y analizar en medio de la incertidumbre sus emisiones, costos, beneficios y alineación con los objetivos de desarrollo y las metas del Acuerdo de París. Hemos utilizado SiSePuede para evaluar estrategias de descarbonización en América Latina y el Caribe en condiciones de incertidumbre.

Calibramos SiSePuede con datos de 18 países que son miembros prestatarios del BID: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana y Uruguay.

SiSePuede modela las emisiones en seis sectores económicos integrados basándose en la metodología del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (IPCC, 2006; 2019): agricultura, industria, edificios, transporte, residuos y producción de electricidad y combustibles. El proceso de modelación de la reducción de emisiones de SiSePuede puede entenderse a través del marco ASIF, diseñado originalmente para el sector del transporte (Schipper y Marie-Lilliu, 1999). ASIF son las siglas de Activity, mode Share, emissions Intensity (actividad, cuota modal, intensidad de emisiones e intensidad de emisiones del combustible). En primer lugar, los niveles de actividad (por ejemplo, la demanda de alimentos, transporte, edificios, producción industrial y energía) se basan en factores subyacentes como el PIB y la población. A continuación, cada actividad se prorratea a un modo de producción (por ejemplo, la fracción de la demanda de calor residencial satisfecha por calefactores de gas natural, estufas de leña o bombas de calor). Cada modo se asocia a una intensidad de emisión específica determinada por la eficiencia y las fuentes de combustible. Las variables que determinan las emisiones se calibran a partir de conjuntos de datos de acceso público sobre la actividad económica, el consumo de energía y las emisiones procedentes de fuentes como el BID, el Banco Mundial, el Fondo Monetario Internacional (FMI), la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). SiSePuede es un modelo gratuito y de código abierto, disponible en GitHub en <https://github.com/jcsyme/sisepuede> y <https://hub.docker.com/r/jcsyme816/sisepuede>, documentado en <https://sisepuede.readthedocs.io>.

Dada la gran cantidad de incertidumbres que influyen en las emisiones, los costos y los beneficios, acoplamos SiSePuede con Robust Decision Making (RDM), un método para gestionar incertidumbres profundas (Lempert, Popper y Bankes, 2003; Groves y Lempert, 2007; Kalra et al., 2015; Lempert, et al., 2013). RDM es un proceso iterativo, apoyado por las partes interesadas, para realizar análisis exhaustivos de "qué pasaría si". Utilizando las técnicas de análisis de vulnerabilidad de RDM, evaluamos las estrategias bajo una serie de condiciones y supuestos futuros para comprender la gama potencial de resultados y condiciones que llevan a las estrategias a cumplir (o no cumplir) los objetivos de descarbonización y económicos. Este método se ha utilizado anteriormente en América Latina y el Caribe para informar la planificación de la descarbonización (Groves et al., 2020, 2022; Quirós-Tortós et al., 2021, 2023; Benavides et al., 2021; Arguello et al., 2022) y la planificación resiliente del agua y el transporte (Kalra et al., 2015; Groves et al., 2021; Molina-Perez et al., 2019; Olaya et al., 2020).

En consonancia con el proceso RDM, nuestro diseño experimental se basó en las aportaciones de los expertos sectoriales del BID. Los involucramos al inicio de nuestra investigación en una primera ronda de talleres sectoriales en los que nos orientaron sobre las transformaciones para lograr la descarbonización, los costos y beneficios de esas transformaciones, las incertidumbres que condicionarían los resultados y los datos y modelos disponibles para fundamentar nuestro análisis. Tras nuestro análisis preliminar, celebramos talleres sectoriales específicos para solicitar revisiones de nuestro diseño experimental y revisar los datos y los resultados. Revisamos nuestro análisis final basándonos en estos comentarios de los expertos.

El desarrollo tradicional provoca altas emisiones

Una trayectoria de Desarrollo tradicional para la región sirve de telón de fondo con el que se comparan otras acciones de descarbonización (denominadas transformaciones). El Desarrollo tradicional refleja un futuro mayoritariamente despreocupado por la descarbonización y alineado con las trayectorias históricas de desarrollo; por ejemplo, la flota de automóviles privados aumenta con el PIB per cápita. Este escenario también incluye un aumento de la eficiencia energética y de la productividad gracias a la mejora de la tecnología, y un modesto incremento del uso de energías renovables para la producción de electricidad. Con una trayectoria de Desarrollo tradicional, estimamos que las emisiones de la región aumentarían un 70%, pasando de 4,1 GtCO₂e en 2020 (emisiones históricas de GEI de Climate Watch, 2022) a 6,9 en 2050 (véase la figura ES.2).

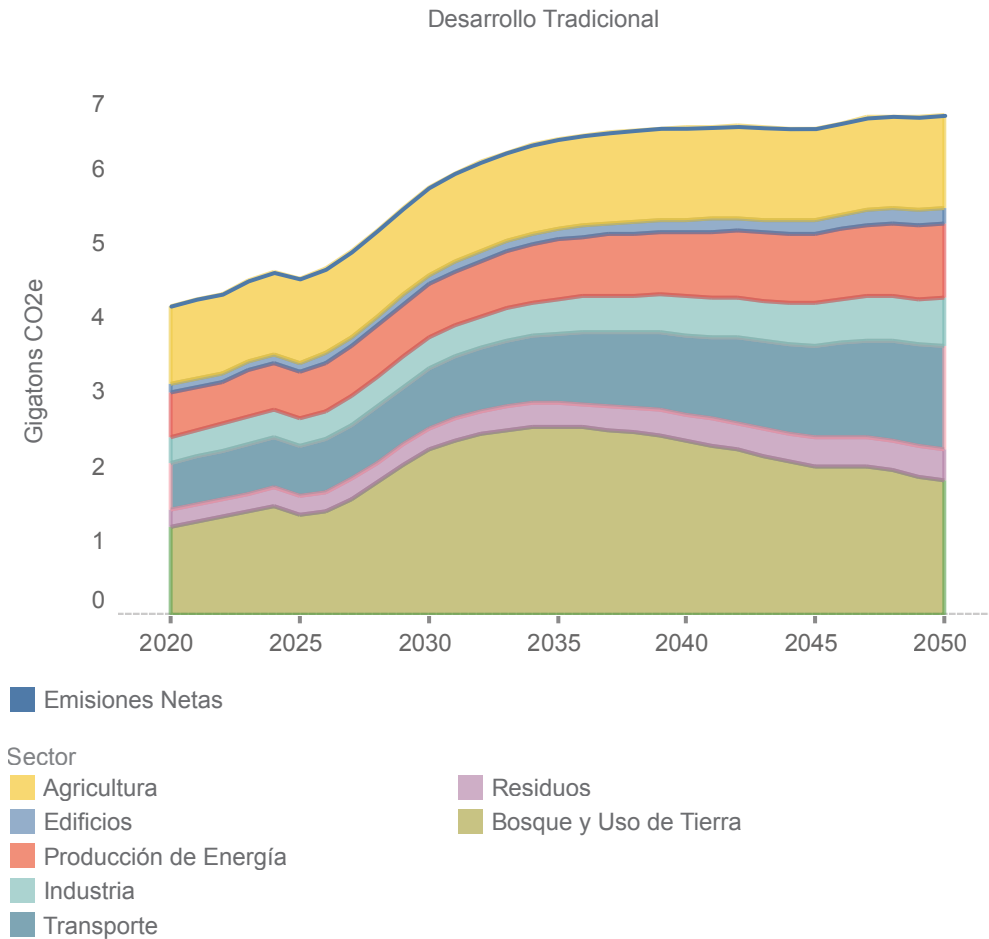


Figura ES.2 Emisiones según el Desarrollo tradicional.

Es importante destacar que el Desarrollo tradicional no es ni debe interpretarse como una proyección de cómo se está desarrollando actualmente América Latina y el Caribe o cómo es probable que se desarrolle en el futuro. En aspectos importantes, es coherente con las tendencias actuales de la región, como la dependencia del gas natural para compensar la escasez de energía hidroeléctrica inducida por la sequía (Climate Watch Historical GHG Emissions, 2022). Sin embargo, actualmente hay muchos esfuerzos para descarbonizar alejando a la región de esa trayectoria de Desarrollo tradicional (Iyer et al., 2017; BID y DDPLAC, 2019). Al menos 10 países de la región han establecido objetivos de carbono-neutralidad, la mayoría de ellos para 2050.

Con el telón de fondo del Desarrollo tradicional, definimos más de 50 transformaciones diferentes en toda la economía (Tabla ES.1). Las emisiones pueden reducirse limitando los niveles de actividad de diferentes sectores; por ejemplo, reduciendo la demanda de viajes fomentando el trabajo desde casa o reduciendo la producción total de alimentos disminuyendo los residuos y las pérdidas. Las transformaciones también pueden afectar a la intensidad de carbono de la actividad del sector, como la mejora de la eficiencia energética de los vehículos privados y los electrodomésticos o la adaptación de las prácticas agrícolas para aumentar el rendimiento de los cultivos. También se pueden realizar cambios estructurales, como producir electricidad a partir de fuentes renovables en lugar de combustibles fósiles, utilizar el transporte público en lugar del automóvil y producir alimentos que tengan una menor intensidad de carbono y menores necesidades de tierra por unidad de nutrición. Por último, se puede pasar de fuentes de energía más sucias a otras más limpias, por ejemplo, produciendo electricidad con energía solar en lugar de gas natural, y utilizando electricidad en lugar de combustibles fósiles en los vehículos y para producir calor en los edificios y la industria.

Cuadro ES.1 Lista consolidada de transformaciones por sector

| Sector | Transformaciones |
|--|--|
| Agricultura, bosques y otros usos de la tierra | <ul style="list-style-type: none"> • Reducir el uso excesivo de fertilizantes • Ampliar la agricultura de conservación • Mejorar el cultivo del arroz • Acelerar la productividad • Utilizar los aumentos de productividad para conservar la tierra • Reducir la fermentación entérica • Ampliar los sistemas silvopastoriles • Gestión del estiércol • Reducir las pérdidas en la cadena de suministro • Detener la deforestación • Inducir la forestación con un cambio en la producción y el consumo agrícolas |
| Industria | <ul style="list-style-type: none"> • Cambio de insumos vírgenes a reciclados • Sustituir el clínker en el cemento • Aumentar la eficiencia energética • Aumentar la eficiencia en el uso de materiales • Cambiar calor de baja temperatura a bombas de calor • Cambiar calor de alta temperatura a electricidad e hidrógeno • Reducir los gases fluorados (F) • Reducir el óxido nitroso (N₂O) en la producción química • Utilizar la captura y el almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés) para el acero, el cemento, los productos químicos y los plásticos |

| | |
|-----------------------|--|
| Edificios | <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la eficiencia energética de los electrodomésticos • Aumentar la eficiencia de la envolvente del edificio • Cambio de combustible a bombas de calor |
| Transporte | <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la eficiencia energética del transporte • Cambio de combustible para el transporte por carretera medio y pesado • Electrificar el ferrocarril • Cambio de combustible marítimo • Cambio modal para el transporte de carga • Electrificar el transporte ligero por carretera • Aumentar la ocupación de los vehículos privados • Cambio modal de los desplazamientos locales de pasajeros hacia el transporte público y no motorizado • Cambio modal de los viajes regionales de pasajeros hacia el autobús y el ferrocarril |
| Producción de energía | <ul style="list-style-type: none"> • Reducir las pérdidas de transmisión • Producir electricidad con energías renovables • Producir hidrógeno con energías renovables • Quema del gas de venteo • Reparar las fugas de emisiones fugitivas |
| Residuos | <ul style="list-style-type: none"> • Saneamiento seguro universal • Tratamiento completo de las aguas residuales • Ampliar la recolección de residuos sólidos y acabar con los vertidos/quemas a cielo abierto • Reciclar los residuos sólidos • Recuperación de energía del tratamiento de aguas residuales • Aumentar la captura y el uso de biogás en digestores y vertederos • Reducir el desperdicio alimentario de los consumidores • Desviar la materia orgánica al compostaje o a digestores |

Alcanzar la carbono-neutralidad es factible y beneficioso

En primer lugar, analizamos el potencial de descarbonización y económico de la región. Descubrimos que cuando todas las transformaciones se aplican con el máximo efecto, lo que denominamos una estrategia de "Todas las acciones", la región podría alcanzar las cero emisiones netas tan pronto como en 2040 bajo supuestos nominales (véase la figura ES.3). (Esta estrategia de desarrollo es probablemente demasiado ambiciosa, por lo que a continuación consideramos escenarios menos drásticos y más realistas). Todas las acciones implican minimizar simultáneamente las emisiones de cada sector económico (industria, transporte, residuos, edificios y producción de energía) y realizar cambios que permitan una forestación masiva para compensar las emisiones residuales, como aumentar la productividad ganadera, proteger los bosques y cambiar los patrones agrícolas.

La Figura ES.4 muestra los costos y beneficios de Todas las acciones en relación con el Desarrollo tradicional entre 2025 y 2050-todas nuestras cifras se dan en dólares estadounidenses de 2019, y los flujos futuros se descuentan utilizando una tasa de descuento del 7%. Bajo supuestos nominales, la adopción de Todas las acciones puede crear 2,7 billones (millones de millones) de dólares en beneficios netos totales para América Latina y el Caribe. Los principales beneficios son el ahorro de combustible (900,000 millones de dólares), la contaminación evitada (500,000 millones de dólares) y otros beneficios en salud, seguridad y productividad (1 billón de dólares); éstos compensan con creces las importantes necesidades adicionales de inversión (1,3 billones de dólares).

Pero incluso cuando sólo se consideran los costos financieros y los beneficios para los sectores (y se excluyen los beneficios difíciles de valorar y en gran medida públicos de la contaminación evitada, los servicios de los ecosistemas y los beneficios en salud, seguridad y productividad), encontramos unos beneficios netos de 700,000 millones de dólares.

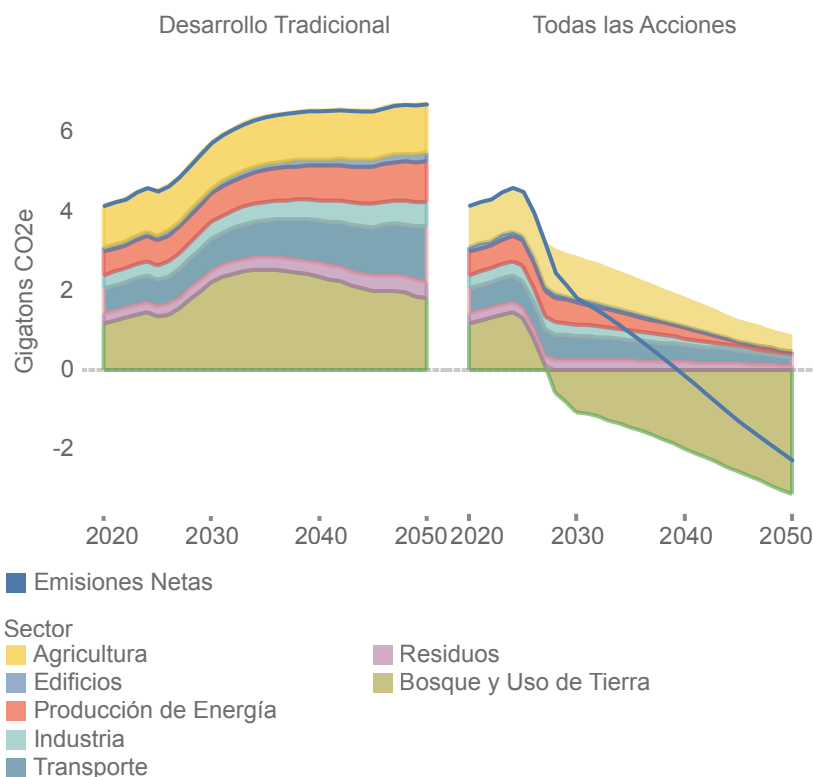


Figura ES.3 Emisiones según el Desarrollo tradicional y Todas las acciones.

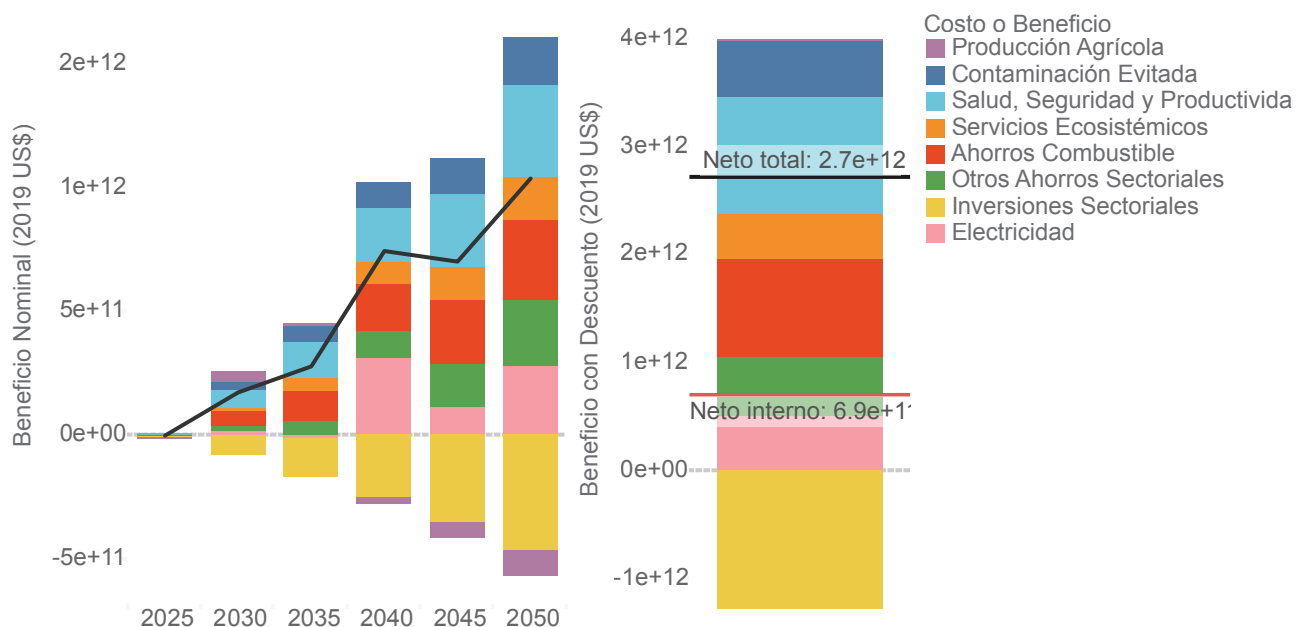


Figura ES.4 Beneficios netos nominales (izquierda) y descontados (derecha) de la adopción de Todas las acciones.

La clave de estos beneficios es que la adopción de Todas las acciones combina los numerosos cambios estructurales necesarios con mejoras en eficiencia en toda la economía. Por ejemplo, las emisiones del sector eléctrico podrían eliminarse pasando de los combustibles fósiles a las energías renovables, pero este enfoque por sí solo plantea a un costo elevado en un futuro en el que la demanda de electricidad aumenta por el cambio de combustible a electricidad e hidrógeno en toda la economía. Si se combina este cambio estructural con un aumento de la eficiencia energética, el sector puede reducir las emisiones en un 95% con un beneficio neto en comparación con un escenario de Desarrollo tradicional. Del mismo modo, las costosas inversiones en el uso de la captura y el almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés) para reducir las emisiones de los procesos industriales pueden disminuir cuando los productos industriales como el acero y el cemento se utilizan de forma más eficiente, reduciendo así la necesidad de producción en primer lugar. En los edificios, el ahorro de electricidad derivado de las intervenciones de eficiencia supera la necesidad adicional de más electricidad debido al cambio de combustible.

Una estrategia de descarbonización robusta tiene tres acciones críticas

Nuestra estrategia "Todas las acciones" sirve como límite superior de lo que la región en su conjunto podría ganar si aplicara agresivamente cambios para descarbonizarse. Pero hacerlo todo en todas partes al mismo tiempo puede no ser factible ni necesario. En la práctica, las estrategias de descarbonización de los países, incluidas sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) y sus Estrategias a Largo Plazo (LTS, por sus siglas en inglés), implicarán transformaciones a diferentes niveles de implementación en función de los impactos, los costos, los beneficios, la disponibilidad tecnológica, la viabilidad política y otras barreras e impulsores de esas acciones.

Para informar esas conversaciones, evaluamos qué acciones son las más importantes para alcanzar la carbono-neutralidad. Generamos aproximadamente 1,000 estrategias de descarbonización que implementan cada transformación de la Tabla ES.1 en diferentes grados y analizamos el resultado de cada estrategia en términos de emisiones, costos y beneficios bajo incertidumbre.

En consonancia con conclusiones anteriores a escala mundial (IPCC, 2023), encontramos que, aunque existen miles de caminos diferentes hacia el cero neto, hay tres cambios que son fundamentales:

1. *Producir electricidad (y, en menor medida, hidrógeno) a partir de fuentes de energía renovables.* Los cambios de combustible en toda la economía reducen las emisiones sólo en la medida en que la electricidad y el hidrógeno -los principales combustibles de sustitución- se produzcan con energías renovables y no con combustibles fósiles. Así pues, la limpieza de la red y la producción de hidrógeno verde son fundamentales para la descarbonización.
2. *Utilizar electricidad (y, en menor medida, hidrógeno) en lugar de combustibles fósiles para alimentar el transporte.* El transporte es uno de los sectores más difíciles para abatir las emisiones de GEI, dadas las numerosas fuentes difusas de emisiones, la creciente demanda de desplazamientos en vehículos privados y la infraestructura construida que perpetúa los patrones de desplazamiento por carretera. Nuestro análisis señala como clave el cambio de combustible en el transporte, ya que reduce las emisiones incluso si los cambios modales y de actividad resultan ser limitados.

3. *Convertir la tierra en un sumidero de carbono.* Esto es necesario para compensar cualquier emisión residual del resto de la economía. Implica proteger los bosques y permitir la forestación mediante una combinación de aumento de la productividad agrícola y cambio de la producción agrícola y el consumo de alimentos con mayor contenido de carbono a alimentos con menor contenido de carbono, que suelen ser más saludables.

Estas tres acciones deben ir acompañadas de otros cambios potencialmente más modestos en toda la economía, como la eficiencia energética de los edificios, el cambio a las bombas de calor, el uso más eficiente de los materiales y la eliminación de los potentes gases fluorados (F).

La aplicación de estos cambios clave también produce beneficios netos en casi todas las condiciones futuras de que hemos examinado. La figura ES.5 muestra el beneficio neto de 2025-2050 (eje horizontal) y las emisiones netas de 2050 (eje vertical) de 1,000 variantes de estrategias de descarbonización con las tres acciones críticas aplicadas y evaluadas en una amplia gama de condiciones inciertas (cada marca del gráfico representa una variante distinta de esta estrategia en condiciones diferentes). Se clasifican en función de si alcanzan, no alcanzan o superan las emisiones netas cero para 2050, y de si suponen costos o beneficios netos. Encontramos que los beneficios tienen una mediana de 1 billón de dólares en todas las condiciones profundamente inciertas que exploramos, una vez descontadas las inversiones técnicas sustanciales, que oscilan entre 0,5 y 1,5 billones de dólares. También en este caso, los mayores beneficios consistentes son en forma de ahorro de costos de combustible, salud, productividad, beneficios de seguridad y servicios de los ecosistemas.

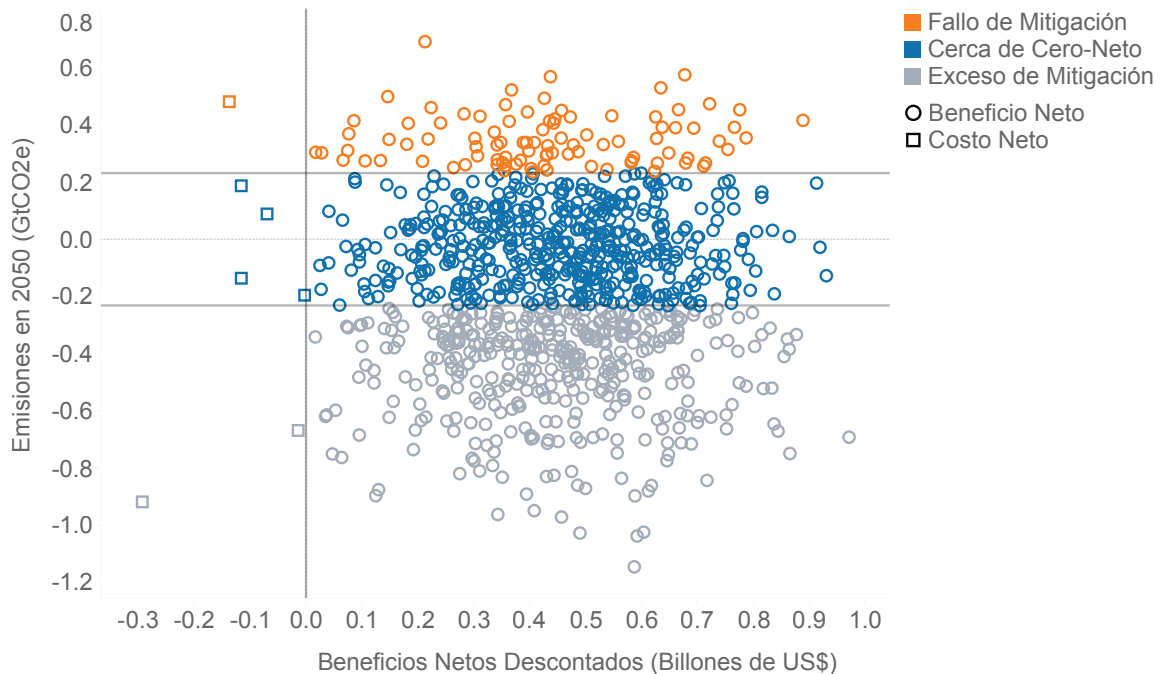


Figura ES.5 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las estrategias de acción críticas bajo incertidumbre.

Las estrategias con las características mencionadas aún pueden no alcanzar la carbono-neutralidad cuando se reducen el secuestro y las compensaciones proporcionadas por los bosques, debido a la reducción de la productividad ganadera y a las menores tasas de secuestro forestal, factores de estrés que pueden verse exacerbados por el cambio climático (Gatti et al. 2021, Rojas-Downing et al., 2017). La reducción de la productividad ganadera aumenta la cantidad de tierra necesaria para criar ganado, incrementando así las presiones para deforestar. La reducción del secuestro significa que deben reservarse aún más zonas para proteger los bosques existentes y devolver las tierras de pastoreo a los bosques secundarios. Para protegerse de estos riesgos es necesario maximizar la productividad ganadera y realizar esfuerzos más intensos para acabar con la deforestación y permitir la repoblación forestal. Medidas como los sistemas silvopastoriles pueden ayudar en todos los frentes.

Las estrategias de desarrollo con bajas emisiones de carbono potencian el desarrollo

Nuestro análisis sugiere que América Latina y el Caribe puede hacer la transición hacia una economía carbono-neutral mientras disfruta de un mejor desarrollo, con beneficios sociales, económicos y medioambientales. Por lo tanto, es lógico preguntarse por qué estas transformaciones no se están produciendo al ritmo que estos resultados podrían justificar.

Existe una gran cantidad de barreras normativas, fiscales, informativas y de otro tipo que se interponen en el camino de los cambios que conducirían a un mejor desarrollo (Fazekas et al., 2022). Por ejemplo, las subvenciones generalizadas asociadas a los combustibles fósiles (Fondo Monetario Internacional, 2021) perpetúan el uso de combustibles fósiles en el transporte y la producción de energía, incluso cuando las energías renovables son la alternativa más rentable. Incluso el entorno construido puede plantear barreras al cambio: la expansión urbana propiciada por el énfasis histórico en los desplazamientos por carretera y la ausencia de carriles para bicicletas y caminos para peatones puede dificultar el cambio posterior del desarrollo hacia los desplazamientos a pie, en bicicleta, en transporte público y otros modos sostenibles, incluso para aquellos que estarían dispuestos a adoptarlos (Mouratidis et al., 2019).

El reto se ve agravado por el hecho de que los costos y los beneficios de las transformaciones recaen sobre personas diferentes, y muchos de los mayores costos se internalizan pero muchos de los beneficios siguen siendo externos a las fuerzas del mercado. Por ejemplo, muchos de los beneficios para la salud, la seguridad, la productividad y el medio ambiente son difusos y mejorarían la vida de muchas personas, mientras que los costos y beneficios técnicos los experimentan más agudamente los agentes del sector. La temporalidad de costos y beneficios también supone un obstáculo: los costos del sector suelen ser inversiones de capital iniciales, mientras que los beneficios del sector se disfrutan a lo largo del tiempo en forma de ahorros operativos, de mantenimiento y de combustible.

Esto demuestra la importancia de las intervenciones gubernamentales para redistribuir los beneficios a través de la sociedad, las políticas fiscales e industriales, la estructura arancelaria y la política social. Por ejemplo, los gobiernos podrían internalizar algunos de los beneficios sociales de la reducción de la congestión y la contaminación atmosférica ajustando los impuestos sobre los combustibles y la propiedad de vehículos o reformando las subvenciones a los combustibles fósiles, reforzando al mismo tiempo las transferencias de efectivo o subvencionando la adopción de tecnologías limpias (por ejemplo, Victor-Gallardo et al., 2022, Missbach et al., 2023). En América Latina y el Caribe, donde la mitad de las emisiones proceden de la agricultura y la deforestación, será fundamental garantizar una transición justa.

La descarbonización no puede producirse a costa de los esfuerzos para reducir la pobreza o garantizar la seguridad alimentaria para todos. Nuestro análisis sugiere que el avance de este sector hará más sólidos los esfuerzos de descarbonización.

Estas barreras y oportunidades dependen crucialmente de los recursos de una nación y de las condiciones económicas y políticas locales, al igual que las prioridades de desarrollo. Por lo tanto, cada país tendrá que construir su propia visión de un futuro con bajas emisiones que comience por los resultados de desarrollo que más necesita; diagnosticar las barreras que le impiden asegurar un futuro con una población más sana, un medio ambiente más saludable y una economía más fuerte; y elaborar sus propios planes para permitir una transición justa hacia la carbono-neutralidad. Por ejemplo, Brasil es el país más grande de la región y alberga la mayor cantidad de selva tropical de todos los países del mundo. Tiene un potencial significativo para reducir las emisiones, en comparación con la estrategia de Desarrollo tradicional, salvaguardando los bosques existentes y promoviendo la forestación. Brasil también disfruta de una red eléctrica relativamente limpia, gracias a enormes cantidades de energía hidroeléctrica. En ese sentido, la situación de Brasil es algo similar a las medias regionales que mostramos aquí. En cambio, como nación insular con un 0,5% de la superficie de Brasil, la República Dominicana tiene mucho menos potencial de secuestro y una mezcla diferente de fuentes de emisiones, donde los procesos industriales y la producción de electricidad desempeñan un papel más importante. En este estudio demostramos que intentar aplicar indiscriminadamente las conclusiones regionales a nivel nacional sería inadecuado.

Diseñar estrategias de descarbonización para cada país requerirá la participación del sector privado, la sociedad civil y los organismos gubernamentales pertinentes. Al implicarse desde el principio en el proceso, las opiniones, la experiencia y las preocupaciones de cada parte interesada pueden dar forma al plan, reforzar el apoyo al mismo y facilitar su aplicación hacia un futuro altamente desarrollado y con bajas emisiones de carbono.

Contenido

| | |
|---|-------|
| Prólogo | iii |
| Acerca de este informe de investigación | vi |
| Acerca del bienestar social y económico de RAND | vi |
| Acerca del Tecnológico de Monterrey | vii |
| Acerca del Banco Interamericano de Desarrollo | vii |
| Acerca de la Plataforma Sendas 2050 | vii |
| Agradecimientos | viii |
| Resumen ejecutivo | x |
| Objetivo y enfoque | xii |
| El desarrollo tradicional provoca altas emisiones | xiv |
| Alcanzar la carbono-neutralidad es factible y beneficioso | xvi |
| Una estrategia de descarbonización robusta tiene tres acciones críticas | xviii |
| Las estrategias de desarrollo con bajas emisiones de carbono potencian el desarrollo | xx |
| Figuras | xxv |
| Tablas | xxvii |
| 1. Introducción | 1 |
| Cooperar para mitigar el cambio climático..... | 2 |
| ¿Una oportunidad para un crecimiento más sostenible? | 3 |
| La planificación de la descarbonización es compleja y muchos países carecen de capacidad | 5 |
| Nuestros objetivos | 7 |
| Desarrollar un conjunto de herramientas analíticas globales para una planificación de la descarbonización más accesible | 7 |
| Desarrollar y evaluar las emisiones, los costos y los beneficios de las transformaciones | 8 |
| Identificar y cuantificar estrategias robustas de descarbonización que cumplan los objetivos de carbono-neutralidad y proporcionen beneficios socioeconómicos netos | 11 |
| Organización de este informe y del material que lo acompaña | 11 |
| 2. Enfoque para evaluar las emisiones, los costos y los beneficios | 12 |
| Diseño de experimentos | 13 |
| El marco analítico de SiSePuede | 15 |
| Enfoque SiSePuede de la contabilidad de emisiones, costos y beneficios | 18 |
| SiSePuede contrasta con otros enfoques de modelización y los complementa | 19 |
| Las limitaciones de SiSePuede | 21 |
| Estrategias y transformaciones | 21 |
| Métricas de emisiones, costos y beneficios | 24 |
| Incertidumbres exógenas | 24 |

Contenido

| | |
|--|-----|
| 3. Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo | 28 |
| Emisiones bajo una trayectoria de Desarrollo tradicional | 29 |
| Exploración de las emisiones, costos y beneficios de las transformaciones | 29 |
| Maximizar las mejoras incrementales | 32 |
| Maximizar las soluciones del lado de la oferta | 33 |
| Maximizar los cambios en el consumo | 34 |
| Maximizar Todas las acciones | 34 |
| Análisis sectorial | 39 |
| Producción de Energía | 39 |
| Agricultura, bosques y otros usos de la tierra | 42 |
| Edificios | 46 |
| Industria | 48 |
| Transporte | 50 |
| Residuos | 53 |
| 4. Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe | 56 |
| Ingredientes clave de las estrategias de descarbonización para la región | 57 |
| Cumplir con solidez los objetivos de carbono-neutralidad en medio de una gran incertidumbre | 61 |
| ¿Las transformaciones críticas alcanzan con solidez las cero emisiones netas en condiciones de incertidumbre? | 62 |
| ¿Qué combinación de condiciones amenaza más los objetivos de carbono-neutralidad? | 63 |
| ¿Qué estrategia alcanza con solidez los objetivos de cero emisiones netas? | 65 |
| Costos y beneficios de la descarbonización de América Latina y el Caribe | 66 |
| ¿Cuál es el abanico de costos y beneficios de alcanzar la carbono-neutralidad con esta estrategia? | 66 |
| ¿Qué condiciones pueden hacer que la descarbonización suponga costos netos? | 67 |
| ¿A quién corresponden los costos y los beneficios? | 67 |
| 5. Resultados nacionales | 70 |
| Brasil | 71 |
| República Dominicana | 77 |
| México | 83 |
| 6. Discusión y Conclusiones | 88 |
| Principales resultados regionales | 89 |
| Obstáculos al cambio | 90 |
| Developing Long-Term Decarbonization Plans for Individual Countries | 91 |
| Próximos pasos | 93 |
| Referencias | 94 |
| Apéndices técnicos | 106 |

Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Mapa de los países incluidos en este análisis | 10 |
| Figura 2.1. Marco conceptual de modelización de SiSePuede | 18 |
| Figura 3.1 Emisiones según el Desarrollo tradicional | 30 |
| Figura 3.2 Emisiones con la aplicación máxima de transformaciones por categoría | 30 |
| Figura 3.3 Utilización de la tierra en hectáreas (ha) bajo la aplicación máxima de transformaciones por categoría | 31 |
| Figura 3.4 Costos y beneficios nominales en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías | 31 |
| Figura 3.5 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías | 32 |
| Figura 3.6 Beneficios netos frente a emisiones netas en 2050 con la aplicación máxima de las transformaciones por categorías | 35 |
| Figura 3.7 Emisiones por sector en 2050 bajo Desarrollo tradicional y Todas las acciones ... | 37 |
| Figura 3.8 Beneficios netos por sector en Todas las acciones | 38 |
| Figura 3.9 Emisiones de la producción de energía por categoría de transformación | 40 |
| Figura 3.10 Costos y beneficios en la producción de energía por categoría de transformación | 41 |
| Figura 3.11 Emisiones producidas por la agricultura, los bosques y el uso de la tierra por categoría de transformación | 43 |
| Figura 3.12 Costos y beneficios de las transformaciones de la agricultura, los bosques y el uso de la tierra por categoría de transformación | 44 |
| Figura 3.13 Emisiones producidas por los edificios por categoría de transformación | 47 |
| Figura 3.14 Costos y beneficios de las transformaciones de edificios por categoría de transformación | 47 |
| Figura 3.15 Emisiones producidas por la industria por categoría de transformación | 49 |
| Figura 3.16 Costos y beneficios de las transformaciones industriales por categoría de transformación | 49 |
| Figura 3.17 Emisiones por modo de transporte por categoría de transformación | 51 |
| Figura 3.18 Costos y beneficios de la transformación del transporte por categoría de transformación | 52 |
| Figura 3.19 Emisiones producidas por los residuos por categoría de transformación | 54 |
| Figura 3.20 Costos y beneficios de la transformación del sector de los residuos por categoría de transformación | 54 |
| Figura 4.1 Trayectorias de emisiones de 1,000 estrategias de descarbonización | 58 |
| Figura 4.2. Emisiones en 2050 frente a la aplicación de cuatro transformaciones críticas | 60 |
| Figura 4.3 Porcentaje de estrategias que alcanzan el cero neto mediante la intensidad de las transformaciones críticas | 61 |
| Figura 4.4 Trayectorias de emisiones de 1.000 variantes de Acciones Críticas en medio de la incertidumbre | 63 |

Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 4.5 Condiciones que impulsan las emisiones de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre | 64 |
| Figura 4.6 Condiciones vulnerables (izquierda) y niveles sólidos de aplicación (derecha) de las acciones críticas | 65 |
| Figura 4.7 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre | 66 |
| Figura 4.8 Principales categorías de costos y beneficios en condiciones de incertidumbre | 68 |
| Figura 4.9 Costos y beneficios internos y externos | 69 |
| Figura 5.1 Emisiones bajo aplicación máxima de transformaciones por categoría, Brasil | 73 |
| Figura 5.2 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías, Brasil | 74 |
| Figura 5.3 Trayectorias de emisiones de 1.000 variantes de Acción Crítica en medio de la incertidumbre, Brasil | 75 |
| Figura 5.4 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre, Brasil | 75 |
| Figura 5.5 Condiciones vulnerables de las acciones críticas, Brasil | 76 |
| Figura 5.6 Emisiones bajo aplicación máxima de transformaciones por categoría, República Dominicana | 78 |
| Figura 5.7 Demanda de combustible en el transporte según trayectorias seleccionadas, República Dominicana | 79 |
| Figura 5.8 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías, República Dominicana | 80 |
| Figura 5.9 Trayectorias de emisiones de 1.000 variantes de Acción Crítica en medio de la incertidumbre, República Dominicana | 81 |
| Figura 5.10 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre, República Dominicana | 82 |
| Figura 5.11 Condiciones vulnerables de las acciones críticas, República Dominicana | 82 |
| Figura 5.12 Emisiones bajo aplicación máxima de transformaciones por categoría, México | 84 |
| Figura 5.13 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías, México | 85 |
| Figura 5.14 Trayectorias de las emisiones totales de gases de efecto invernadero bajo incertidumbre a través de las estrategias, México | 86 |
| Figura 5.15 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre, México | 86 |
| Figura 5.16 Condiciones vulnerables de las acciones críticas, México | 87 |

Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Resumen del diseño experimental de Métricas y Estrategias | 16 |
| Table 2.2 Lista y estadísticas clave a partir de 2020 de los países incluidos en el estudio | 17 |
| Tabla 2.3 Transformaciones en mejoras incrementales, soluciones del lado de la oferta y cambios en el consumo categorías | 19 |
| Tabla 2.4 Costos y beneficios de la transformación por sectores | 26 |
| Tabla 2.5. Incertidumbres | 27 |
| Tabla 4.1 Transformaciones críticas y explicación de los niveles de aplicación | 59 |

Costos y beneficios de lograr
la carbono-neutralidad en
América Latina y el Caribe

1

CAPÍTULO

Introducción

El cambio climático supone una grave amenaza para el desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe (Talbot-Wright y Vogt-Schilb, 2023). Sus efectos incluyen desastres naturales más frecuentes e intensos, aumento del nivel del mar, cambios en los patrones climáticos locales y pérdida de servicios vitales de los ecosistemas. Las repercusiones para los seres humanos son enormes, incluidas las amenazas a la seguridad alimentaria y del agua, la interrupción de las infraestructuras, el aumento de la morbilidad y la mortalidad humanas, y la disminución de la productividad laboral, los ingresos de los hogares, los ingresos fiscales y los ingresos del turismo. Además, el cambio climático afecta de forma desproporcionada a las personas pobres y con escasa representación, creando un círculo vicioso. La vulnerabilidad de las poblaciones urbanas y de los pequeños estados insulares es especialmente preocupante. Aunque la adaptación es esencial y urgente, esta es inadecuada frente al cambio climático descontrolado (Parmesan et al., 2022).

El calentamiento global sólo empeorará a medida que el mundo emita GEI. Limitar el aumento de la temperatura entre 1,5 y 2 °C por encima de los niveles preindustriales, el objetivo global del Acuerdo de París, requiere alcanzar cero emisiones netas de GEI en torno a 2050 (Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2015). Cero emisiones netas significa reducir las emisiones tanto como sea posible y utilizar compensaciones, como la reforestación, como último recurso para compensar las emisiones que son demasiado difíciles o caras de reducir.

Se trata de objetivos ambiciosos. Mitigar el cambio climático requiere cambios masivos en todos los sectores y países (BID, 2019; Fazekas et al., 2022). Cumplir tanto los objetivos de resiliencia como los de descarbonización requiere realinear el equivalente del 7 al 19% del PIB con los objetivos del cambio climático cada año (Galindo Paliza et al., 2022). Aunque no se trata de un costo neto, ya que gran parte del esfuerzo implica redirigir la financiación privada nacional existente de las inversiones o tecnologías tradicionales a alternativas con menos emisiones (por ejemplo, autobuses diésel a eléctricos), ilustra la magnitud y profundidad del esfuerzo necesario (Fazekas et al., 2022).

Cooperar para mitigar el cambio climático

Para organizar esta acción, el Acuerdo de París exige a los países que presenten las NDC periódicamente y que se esfuercen por formular y comunicar las LTS. En la COP26, en la Decisión 1/CMA.4, los signatarios del Acuerdo de París también señalaron la importancia de alinear las NDC que tienen plazos más cortos con las LTS para facilitar una transición justa hacia una economía carbono-neutral hacia mediados de siglo (CMNUCC, 2023a). Sin embargo, los compromisos y las políticas mundiales siguen estando muy lejos de los objetivos de París. Las políticas actuales provocarían un calentamiento de entre 2,6 y 2,9 °C, mientras que las NDC lo limitarían a sólo 2,4 °C (Climate Action Tracker, 2022c). Sólo seis países en todo el mundo tienen objetivos de carbono-neutralidad calificados como "aceptables" por Climate Action Tracker en términos de diseño transparente, exhaustivo y sólido.

Esta situación es cierta en América Latina y el Caribe. De los 33 países de la región que forman parte del Acuerdo de París, al menos 10 se han comprometido a alcanzar las cero emisiones netas para 2050 o antes (Climate Watch Data, 2023). Sin embargo, las NDC de la región sólo reducirían las emisiones en aproximadamente un tercio en comparación con los niveles de emisiones actuales, muy por debajo de lo necesario para encaminarlos hacia cero emisiones netas en 2050 (Cárdenas y Orozco, 2022; Binsted et al., 2020). De hecho, sólo ocho países han preparado LTS que podrían informar las actualizaciones de las NDC y, de ellos, sólo tres -Costa Rica, Chile y Colombia- están calificados como "aceptables" con respecto a un objetivo de emisiones netas cero por Net-Zero Tracker (2023). De ellos, el LTS de Costa Rica tradujo el objetivo de cero emisiones netas para 2050 en un marco con más de 70 objetivos de cumplimiento inmediato, que atrajo 1,400 millones de dólares en préstamos basados en políticas de financiadores internacionales (Jaramillo et al., 2023). Por desgracia, Costa Rica no es representativa de toda la región, ya que la mayoría de los países carecen de una estrategia de política pública que sirva de base para una acción inmediata coherente con el logro de los objetivos de sus NDC (Jaramillo y Saavedra, 2021).

Una cuestión clave es si los países de América Latina y el Caribe deben hacer más para reducir las emisiones. Según el Acuerdo de París, se espera que las partes actúen de acuerdo con el principio de Responsabilidades Comunes pero Diferenciadas y Capacidades Respectivas (CBDRRC, por sus siglas en inglés). Al fin y al cabo, la mayoría de los GEI presentes en la atmósfera se emiten desde fuera de la región. Por ejemplo, el desarrollo económico se ha alimentado principalmente de carbón, gasolina y gas natural. Cuanto más rico es un país, más probabilidades tienen sus ciudadanos de poseer coches, más kilómetros recorren al año, más grandes son las casas en las que viven y más alimentos consumen. Por ello, muchos han propuesto que la mayor parte de las reducciones de emisiones se produzcan en los países desarrollados, dejando espacio para que los países menos desarrollados sigan las vías tradicionales de desarrollo, quizá contaminando en el proceso (Vogt-Schilb, 2023).

¿Una oportunidad para un crecimiento más sostenible?

La reducción de las emisiones no está necesariamente contrapuesta con el crecimiento económico. Los patrones de desarrollo en todo el mundo, incluidos los de América Latina y el Caribe, han distado mucho de ser óptimos. Por ejemplo, el reciente crecimiento económico de la región ha dado lugar al crecimiento más rápido de la propiedad de automóviles en el mundo (SLOCAT 2021). Esto ha brindado oportunidades económicas y un alto nivel de vida a millones de personas. Pero también supone importantes costos para la región, como la pérdida de vidas y los costos sanitarios relacionados con los accidentes, la congestión de las carreteras y la contaminación atmosférica (Calatayud et al., 2021; Chen et al., 2019; Husaini et al., 2022). En Río de Janeiro y Sao Paulo, por ejemplo, la congestión costó el 8% del PIB de las regiones metropolitanas, y el 2% del PIB general de Brasil, en 2014 (FIRJAN, 2015). La región también cuenta con más de 100 millones de residentes que viven en zonas con niveles de contaminación atmosférica que superan las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Riojas-Rodríguez et al., 2016).

Con políticas e inversiones que promuevan una transición hacia el transporte y el tránsito no motorizados, una mayor ocupación de los vehículos, una mayor eficiencia de los vehículos y vehículos electrificados, los países de la región podrían seguir mejorando sus niveles de vida y, al mismo tiempo, evitar encerrarse en una trayectoria de desarrollo con altas emisiones de carbono.

Del mismo modo, los actuales patrones de producción y consumo de alimentos en América Latina y el Caribe conllevan importantes costos para la salud pública y el medio ambiente. Aproximadamente 43 millones de personas en la región están desnutridas y 133 millones de personas no pueden permitirse una dieta saludable porque la región tiene el mayor nivel de desigualdad de ingresos del mundo, una situación agravada por la reciente pandemia mundial (Salazar y Muñoz, 2018; FAO, FIDA, UNICEF, PMA y OMS, 2023). Al mismo tiempo, las tasas de obesidad son altas y van en aumento, impulsadas por dietas pobres en frutas y verduras (Popkin y Reardon, 2018; Guthold et al., 2018). En Sudamérica, las dietas ricas en carne roja, el grupo alimentario más negativamente asociado a las enfermedades no transmisibles (Popkin y Reardon, 2018), se han relacionado con la muerte prematura de más de 60,000 personas en 2018 (Hartinger et al., 2023). Y la conversión en pastos es el mayor impulsor de la deforestación, amenazando 15 billones de dólares en servicios forestales (Climate Watch, 2022; Hernández-Blanco et al., 2020). Un cambio en la producción y el consumo hacia alimentos más sanos, en conjunción con mejores prácticas agrícolas, podría ayudar a evitar más de 500,000 muertes prematuras y proporcionar 100,000 millones de dólares a 2 billones de dólares en beneficios para la salud en 2050 (Springmann et al., 2016), al tiempo que se reducen las emisiones mediante la preservación de los bosques, la forestación, evitando la fermentación entérica y reduciendo las emisiones de estiércol.

A menudo, la mejor forma de cerrar las brechas de desarrollo también se traduce en una reducción de las emisiones. Lograr el suministro universal de agua potable y saneamiento no sólo es un Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) clave, sino que la recolección, la gestión segura, el tratamiento y la recuperación energética de los residuos y las aguas residuales son fundamentales para reducir las emisiones de GEI (Rani et al., 2022; de Foy et al., 2023).

Por último, cada vez hay más pruebas de que la reducción de las emisiones puede ser rentable, incluso en los países en desarrollo (Fazekas et al., 2022). Una de las razones es que el costo de la tecnología clave se ha desplomado. Los mejores ejemplos son los paneles solares y las turbinas eólicas, que cuestan menos del 10% y el 30%, respectivamente, de lo que costaban en 2009 (IRENA, 2022). Ahora son la opción más barata disponible para la producción de energía, mientras que eran la opción más cara cuando los países europeos, norteamericanos y asiáticos construyeron la mayor parte de sus centrales eléctricas de carbón (AIE, 2023). Por ello, las inversiones en la producción de electricidad renovable ofrecen importantes beneficios financieros en forma de ahorro de combustible. Además, las tecnologías que funcionan con electricidad, como los vehículos eléctricos o las bombas de calor, suelen ser más baratas de operar y mantener que sus homólogas basadas en combustibles fósiles, aunque la financiación de los elevados costos iniciales sigue siendo un reto (Rissman, 2022; AAA, 2019; Burke et al. 2022).

De hecho, investigaciones previas a nivel nacional han descubierto que alcanzar la carbono-neutralidad podría suponer beneficios netos de aproximadamente 41,000 millones de dólares en Costa Rica, 7,000 millones de dólares en Chile, 330,000 millones de dólares en Colombia y 140,000 millones de dólares en Perú (Groves et al., 2020; Benavides et al., 2021; Arguello et al., 2022; Quirós-Tortos et al., 2021). Los estudios regionales han sugerido que los esfuerzos de descarbonización pueden aumentar el PIB de América Latina y el Caribe en un 1% para 2030 (Vogt-Schilb, 2021), al tiempo que crean millones de empleos verdes (Saget et al., 2020).

La planificación de la descarbonización es compleja y muchos países carecen de capacidad

Aunque la reducción de las emisiones pueda contribuir al desarrollo, es fácil que los planes de descarbonización se sientan desconectados de los objetivos, los conocimientos y el contexto de los ciudadanos de a pie y de los responsables de la toma de decisiones que deben ponerlos en práctica (Calfucoy et al., 2022). Los ministerios de medio ambiente de los gobiernos suelen ser los responsables de diseñar las estrategias climáticas. Sin embargo, las acciones descritas en estos planes deben ser aplicadas por el sector privado, por organismos gubernamentales de otros ministerios -como los de transporte, energía, agricultura, industria y finanzas (Fazekas et al., 2022)- y por diversos niveles de gobierno, desde el nacional hasta el municipal (Rakes et al., 2023; Vera et al., 2023). Puede que estos actores simpaticen con el cambio climático, pero tienen otras prioridades -incluidos el crecimiento y la productividad, la mano de obra y preocupaciones específicas del sector como la congestión, los costos sanitarios y la seguridad alimentaria- y poco conocimiento de lo que significan para ellos las cero emisiones netas y de cómo alcanzar estos objetivos.

De hecho, gran parte de la investigación existente sobre descarbonización y elaboración de planes no es directamente utilizable por estos actores. Muchos análisis describen las medidas de mitigación en términos de sus costos por tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) evitada (por ejemplo, Cárdenas y Orozco, 2022; Hof et al., 2017; Johnson et al., 2009). Centrarse en la reducción de emisiones y en su costo marginal puede tener sentido para los economistas del cambio climático, pero no es el lenguaje de los agricultores, las autoridades de tránsito o los operarios de fábricas, que hablan en términos de cabezas de ganado, número de autobuses y toneladas de cemento. Para estar motivados y poder actuar, estos líderes necesitan saber qué transformaciones específicas deben promulgar en su sector para avanzar hacia la carbono-neutralidad. Éstas deben expresarse de forma tangible y práctica, como producir electricidad con un 50% de energía solar y eólica para 2030; cambiar el 70% del transporte local al transporte público, a pie o en bicicleta para 2040; o reforestar 1,000,000 de hectáreas de pastos degradados para 2050 (Fay et al., 2015; Waisman et al., 2019). A su vez, esto puede proporcionar información concreta a los ministerios de finanzas para planificar los presupuestos públicos, aclarar las prioridades de inversión pública, evaluar los impactos y los ajustes necesarios en la política fiscal (Solano-Rodríguez et al., 2021; Victor-Gallardo et al., 2022), y gestionar la deuda para apoyar la ejecución en todos los sectores, además de indicadores macroeconómicos relevantes como el empleo, el PIB y la dinámica de la balanza comercial en la transición (Orozco y Jaramillo, 2021; Delgado et al., 2021).

Desarrollar planes que alcancen la carbono-neutralidad y se alineen con los conocimientos, preocupaciones y prioridades de las partes interesadas y los ciudadanos es un reto analítico. Los modelos de emisiones integrados y multisectoriales son complejos y costosos de desarrollar y pueden llevar mucho tiempo y ser difíciles de utilizar. Los datos necesarios para elaborar estimaciones creíbles son vastos y heterogéneos y, sobre todo en el caso de los países de la región, existen enormes lagunas de datos en sectores esenciales. Además, las condiciones cambian rápidamente, lo que requiere métodos analíticos sofisticados para gestionar las profundas incertidumbres. Muchos países se enfrentan a problemas de capacidad para crear planes sólidos de descarbonización y desarrollo (Banco Mundial, 2022). Esto en parte puede explicar por qué sólo el 15% de los países menos desarrollados han presentado LTS, en comparación con más del 80% de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (Climate Watch LTS Explorer, 2020).

Además, la participación activa durante la fase de formulación del LTS de aquellos que tendrán que aplicarlo es esencial para fundamentar el análisis y aumentar la aceptación; los responsables políticos no suelen aceptar planes en cuya elaboración no han participado (Niet et al., 2021; Calfucoy et al., 2022). Al implicarse en una fase temprana del proceso, sus opiniones, experiencia y preocupaciones pueden dar forma al plan y facilitar su ejecución. Este enfoque requiere el uso de procesos y herramientas flexibles para garantizar que los puntos de vista de las partes interesadas se tengan realmente en cuenta y se integren en el análisis. Este tipo de experiencia suele ser difícil de establecer.

Reconociendo la necesidad de apoyo, muchas organizaciones han lanzado iniciativas para posibilitar la planificación de la descarbonización. En el BID, el proyecto de Caminos de Descarbonización Profunda de América Latina pretendía crear tanto capacidades analíticas como una comunidad de práctica en torno a la planificación de la descarbonización (Bataille et al., 2020; BID, 2019). Este programa puso en marcha análisis de descarbonización para Argentina, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México y Perú. En el Banco Mundial, los Informes Nacionales sobre el Clima y el Desarrollo pretenden ayudar a los gobiernos, a los líderes sectoriales y a las partes interesadas a evaluar y priorizar las acciones climáticas, en particular aquellas que también pueden impulsar los objetivos de desarrollo (Banco Mundial, 2022). La 2050 Pathways Platform, una iniciativa gubernamental y de múltiples partes interesadas, también pretende apoyar el desarrollo de LTS y proporcionar asistencia financiera y técnica para ayudar a los gobiernos a formular LTS adaptadas a las prioridades de cada país (The 2050 Pathways Platform, 2023). Otras iniciativas internacionales para apoyar el desarrollo de LTS incluyen la Facilidad AFD 2050 (AFD, 2023) ; la Iniciativa Internacional Alemana sobre el Clima (IKI, 2023) ; el Acelerador Neto-Cero de Naturaleza-Positiva del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, 2023) ; y la Asociación para las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCP, 2023).

Una lección del desarrollo del LTS es que los modelos pueden servir para una conversación de todo el gobierno y la sociedad, ayudar a crear consenso, encontrar sinergias entre la descarbonización y los objetivos de desarrollo, y hacer que cualquier estrategia de cero neto sea más procesable. La modelización en universidades o grupos de reflexión realizada a nivel nacional también puede ser una forma de convocar a los actores relevantes al proceso y aliviar la carga de trabajo de los líderes gubernamentales.

Por último, el trabajo de modelación puede utilizarse para facilitar la coordinación entre los diversos socios internacionales para el desarrollo, haciendo más eficaz la prestación de ayuda (Jaramillo et al., 2023).

Nuestros objetivos

Teniendo en cuenta estos factores, pretendemos contribuir a que los países comprendan mejor las estrategias de descarbonización que están en consonancia con las necesidades sociales, económicas, medioambientales y de desarrollo de las personas que las aplicarán y experimentarán sus efectos. Basándonos en trabajos previos realizados en Chile, Costa Rica, Colombia, la República Dominicana y Perú (Benavides et al., 2021; Groves et al., 2020; Arguello et al., 2022; Quirós-Tortos et al., 2023; Quirós-Tortos et al., 2021), avanzamos en estos objetivos para América Latina y el Caribe a través de tres áreas de trabajo.

Desarrollar un conjunto de herramientas analíticas globales para una planificación de la descarbonización más accesible

Comenzamos presentando SiSePuede (sImulación de vías sEctoriales y exploración de la incertidumbre para la dEcarbonización), un marco de referencia para diseñar estrategias de mitigación y analizarlas considerando la incertidumbre de emisiones, costos, beneficios y alineación con las NDC, los ODS y los objetivos del Acuerdo de París.

SiSePuede modela las emisiones en seis sectores económicos basándose en la metodología del IPCC (IPCC, 2006; IPCC, 2019): agricultura, industria, edificios, transporte, residuos y producción de electricidad y combustibles. El proceso de modelación de emisiones de SiSePuede puede entenderse a través del marco ASIF, diseñado originalmente para el sector del transporte (Schipper y Marie-Lilliu, 1999). ASIF son las siglas de Activity, mode Share, emissions Intensity (actividad, cuota modal, intensidad de emisiones e intensidad de emisiones del combustible). En primer lugar, los niveles de actividad (por ejemplo, la demanda de alimentos, transporte, edificios, producción industrial y energía) se basan en los factores subyacentes del PIB y la población. A continuación, cada actividad se prorratea a un modo de producción (por ejemplo, la fracción de la demanda de calor residencial satisfecha por calefactores de gas natural, estufas de leña o bombas de calor). Cada modo se asocia a una intensidad energética específica satisfecha por una mezcla de combustibles con intensidades de emisiones específicas. Las variables que impulsan las emisiones se calibran en función de conjuntos de datos disponibles públicamente sobre la actividad económica, el consumo de energía y las emisiones procedentes de fuentes como el BID, el Banco Mundial, el FMI, la AIE y la FAO. Estos sectores también están integrados, por ejemplo, un aumento de la captura de biogás de vertedero reduce la demanda de extracción de gas fósil; la reducción de las pérdidas en la cadena de suministro agrícola reduce los residuos en el flujo de residuos; y el cambio del uso de cemento a madera en los edificios modifica las tasas de deforestación. SiSePuede está disponible en GitHub en <https://github.com/jcsyme/sisepuede> y en <https://hub.docker.com/r/jcsyme816/sisepuede> documentado en <https://sisepuede.readthedocs.io>.

Desarrollar y evaluar las emisiones, los costos y los beneficios de las transformaciones

A continuación, utilizamos SiSePuede para evaluar las estrategias de descarbonización de los 18 países de América Latina y el Caribe (véase la figura 1.1). Estos son el subconjunto de los 26 países miembros del BID para los que determinamos subjetivamente que los datos existentes y las imputaciones de los datos que faltan nos permitirían calibrar el modelo. Para estos países, las emisiones son de aproximadamente 4,1 GtCO_{2e} netas de cambios en el uso de la tierra y secuestro.

Una trayectoria de "Desarrollo tradicional" para la región sirve de telón de fondo con el que se comparan otras opciones de descarbonización denominadas transformaciones. El Desarrollo tradicional refleja un futuro en gran medida despreocupado por la descarbonización y coherente con las trayectorias históricas de desarrollo. Incluye una demanda creciente de bienes y servicios en general; y, en consonancia con las tendencias pasadas asociadas a un crecimiento del producto interior bruto (PIB) per cápita, se produce un aumento del consumo de carne y de la propiedad de automóviles privados. Aunque hay una modesta mejora de fondo en la intensidad energética (AIE, IRENA, UNSD, Banco Mundial, OMS, 2023) y cierta transición hacia las energías renovables (IRENA 2018), también hay una importante dependencia continuada de los combustibles fósiles en toda la economía.

Con este telón de fondo, definimos más de 50 transformaciones diferentes en toda la economía (véase la tabla 2.3 de la sección 2). En consonancia con el marco ASIF, en primer lugar, las emisiones pueden disminuir reduciendo la actividad; por ejemplo, reduciendo la demanda de viajes fomentando el trabajo desde casa o reduciendo la producción total de alimentos reduciendo los residuos y las pérdidas. En segundo lugar, las transformaciones pueden afectar a la intensidad energética de la actividad del sector, como la mejora de la eficiencia energética de los vehículos o de los electrodomésticos o la adaptación de las prácticas agrícolas para aumentar el rendimiento. En tercer lugar, se pueden realizar cambios estructurales, produciendo electricidad a partir de fuentes renovables en lugar de combustibles fósiles, utilizando el transporte público en lugar de coches individuales y produciendo alimentos que tengan una menor huella de carbono y de tierra por unidad de nutriente. Por último, se puede pasar de fuentes de energía más elevadas a otras más limpias, por ejemplo, produciendo electricidad con energía solar en lugar de gas, y utilizando electricidad en lugar de combustibles fósiles en los vehículos y para producir calor en los edificios y la industria (Fazekas et al., 2022).

Además de esta tipología de reducción de las emisiones, una cuestión habitual es si los consumidores o los productores deben ser considerados responsables de la reducción de las emisiones. Esta distinción puede ser engañosa, en el sentido de que tanto los consumidores como los productores responden a las inversiones en infraestructuras, las opciones normativas y las señales de precios configuradas por el gobierno (Fazekas et al., 2022). Pero sí importa porque determina cómo se comunica el gobierno con las personas y las empresas sobre la descarbonización y cómo se percibe ésta.

Clasificamos las opciones de reducción de emisiones en tres categorías mutuamente excluyentes que reflejan diferentes enfoques de la descarbonización. Las transformaciones que son "mejoras incrementales" consiguen beneficios marginales sobre las prácticas actuales, sin realizar cambios estructurales significativos.

Esto incluye, por ejemplo, el aumento de la eficiencia energética de los vehículos, el aumento de la capacidad de carga del ganado y la ampliación de la gestión básica de los residuos y las aguas residuales. Muchas de estas transformaciones afectan al factor de intensidad del marco ASIF.

Otras transformaciones entran en el ámbito de las "soluciones del lado de la oferta" y pueden implicar cambios estructurales significativos en la producción, como la búsqueda de una electricidad casi libre de emisiones, el cambio a procesos industriales como la producción de acero a base de hidrógeno y la transición del transporte a la electricidad. Estos cambios suelen realizarlos los productores y no están bajo el control significativo de los consumidores; a menudo ni siquiera son directamente observables por los consumidores. Muchas de estas transformaciones se alinean con factores de estructura y combustible.

Una tercera categoría de transformaciones consiste en "Cambiar el consumo" e incluye transformaciones que son observables por los consumidores y que a menudo implican su participación. Algunos ejemplos son el uso del transporte público en lugar del automóvil personal para los desplazamientos o el cambio de los patrones de producción y consumo de alimentos para reducir la importancia relativa de los alimentos con alta huella de carbono y aumentar la de los alimentos con baja huella de carbono. Muchas de estas transformaciones afectan a los factores de actividad y estructura. Para que quede claro, estas divisiones son desordenadas y subjetivas: muchas transformaciones caen a través de las categorías, y el mundo real abarcará complejas combinaciones de transformaciones a través de las divisiones.

Utilizamos estas transformaciones individualmente y en combinaciones para ver cómo las diferentes acciones podrían afectar a las emisiones y a los resultados de desarrollo en América Latina y el Caribe y alcanzar el cero neto. Cuantificamos los resultados de desarrollo utilizando estimaciones encontradas en la literatura sobre sus costos y beneficios. Esto incluye los costos o beneficios técnicos que los actores generalmente experimentan dentro de un sector y que también suelen ser internos a los mercados, como el coste para el sector agrícola de capturar el biogás del ganado, el coste de aumentar la eficiencia energética en la industria o el coste de las inversiones en el sector eléctrico para que la nueva capacidad pueda seguir el ritmo de la creciente demanda. También incluimos los costos o beneficios no técnicos que son primordiales para alinear la descarbonización con los objetivos de desarrollo, como los beneficios para la salud de evitar los accidentes de tráfico y la contaminación atmosférica, el valor de conservar la biodiversidad o el tiempo ahorrado gracias a una menor congestión (Fazekas et al., 2022). Muchos de estos beneficios corresponden a personas distintas de los agentes del sector y/o pueden ser ajenas al mercado. Excluimos el costo social del carbono (Nordhaus, 2017) como uno de los beneficios de la descarbonización, por dos razones. En primer lugar, la descarbonización es un objetivo en sí mismo, destinado a evitar los impactos del cambio climático. Consideramos las emisiones netas cero como un objetivo que los gobiernos individuales pueden fijarse para sí mismos, no para compensar otros costos y beneficios. En segundo lugar, tratamos de entender cómo las estrategias para descarbonizar pueden reportar costos y beneficios al desarrollo, al margen de sus efectos climáticos. Por supuesto, esto significa que estamos subestimando el valor de la descarbonización para el desarrollo, por ejemplo, ya que el costo de producir alimentos en América Latina y el Caribe será mayor en un mundo con más extremos climáticos, y la pérdida de infraestructuras será masiva (Talbot-Wright y Vogt-Schilb, 2023).

Para lograr estas transformaciones será necesario aplicar una amplia gama de políticas y normativas. Por ejemplo, para favorecer los cambios modales en el transporte, los gobiernos pueden optar por subvencionar a los operadores privados de transporte masivo, invertir en infraestructuras de tránsito, restringir el uso del automóvil de pasajeros mediante tasas de aparcamiento o de congestión, etc. Dado que muchas medidas darán lugar a ganadores y perdedores, los gobiernos tendrán que gestionar adecuadamente la transición para mitigar los posibles impactos negativos, con el fin de llevar a cabo una transición más justa. Las políticas que deben promulgarse para llevar a cabo las transformaciones y gestionar adecuadamente sus impactos quedan fuera del ámbito de este estudio.

Tampoco evaluamos a propósito las NDC y las LTS de los países en este estudio. Aunque las NDC y las LTS incluyen muchas de las transformaciones que analizamos, está bien documentado que se quedan muy lejos de los objetivos de París (Cárdenas y Orozco, 2022; Binsted et al., 2020). En lugar de evaluar aquí las NDC y las LTS existentes, esperamos informar las futuras iteraciones de esas políticas con un análisis que vaya más allá de las transformaciones que ya consideran, incluyendo algunas que rara vez se discuten, como los cambios en la producción y el consumo de alimentos. El capítulo 6 detalla cómo podríamos hacerlo utilizando SiSePuede y nuestras conclusiones.



Figura 1.1 Mapa de los países incluidos en este análisis.

Identificar y cuantificar estrategias robustas de descarbonización que cumplan los objetivos de carbono-neutralidad y proporcionen beneficios socioeconómicos netos.

Por último, examinamos los costos, beneficios y efectos de estas transformaciones sobre las emisiones en los próximos 25 años. Estas perspectivas son profundamente inciertas y estarán condicionadas por factores que podemos imaginar pero no predecir -por ejemplo, los costos cambiantes de la producción de hidrógeno verde o la capacidad de secuestro de los bosques en un planeta que se calienta cada vez más-, así como por factores que pueden cambiar de manera súbita, como la reciente pandemia mundial. El reto de evaluar los efectos se ve aún más agravado por la omnipresente falta de datos y la rápida evolución de las condiciones socioeconómicas, sobre todo en el caso de los países en desarrollo que, por su naturaleza, experimentan rápidos cambios.

La profunda incertidumbre plantea preguntas clave: ¿Qué combinación de transformaciones, con qué intensidades, tienen mayores oportunidades de alcanzar el objetivo de cero emisiones y beneficios netos? ¿Y qué acciones o incertidumbres amenazan más estos objetivos? Guiados por los métodos de toma de decisiones bajo incertidumbre profunda (DMDU, por sus siglas en inglés) (Marchau et al., 2019), evaluamos las transformaciones bajo miles de combinaciones de supuestos sobre el futuro. A partir de los resultados, podemos identificar qué transformaciones son esenciales para alcanzar las emisiones netas cero, y qué combinación de transformaciones alcanza con mayor solidez la carbono-neutralidad en 2050 al tiempo que proporciona beneficios netos de forma consistente. Estos conocimientos pueden ayudar a los países a desarrollar y adaptar mejor las NDC, las LTS y otros planes climáticos y de desarrollo. También pueden ayudar a los socios internacionales para el desarrollo a priorizar sus inversiones y el diálogo político en América Latina y el Caribe.

Organización de este informe y del material que lo acompaña

El resto de este informe documenta nuestro enfoque y nuestras conclusiones. El capítulo 2 describe nuestro enfoque, incluyendo el modelo, los datos, la metodología y el diseño experimental. El capítulo 3 explora las emisiones, los costos y los beneficios de las transformaciones en varias categorías para América Latina y el Caribe, en conjunto y luego para sectores individuales. El capítulo 4 amplía el análisis para trazar una sólida senda de descarbonización para la región en medio de una profunda incertidumbre. El capítulo 5 destaca las diferentes implicaciones de una estrategia regional en algunos de los países incluidos en el estudio. El capítulo 6 concluye con una revisión de las principales conclusiones, las implicaciones para la descarbonización y los próximos pasos.

Además de este informe, nuestro trabajo está documentado por apéndices técnicos que describen SiSePuede y el proceso de modelación, los datos, las transformaciones y los costos y beneficios en cada sector. Como ya se ha mencionado, SiSePuede y los datos que lo acompañan están a disposición del público para su descarga en <https://github.com/jcsyme/sisepuede> y <https://hub.docker.com/r/jcsyme816/sisepuede>, documentados en <https://sisepuede.readthedocs.io>.

Costos y beneficios de lograr
la carbono-neutralidad en
América Latina y el Caribe

2

CAPÍTULO

**Enfoque para evaluar las emisiones,
los costos y los beneficios**

En este estudio, hemos desarrollado y utilizado el marco analítico SiSePuede para identificar las estrategias mediante las cuales América Latina y el Caribe pueden alcanzar la carbono-neutralidad, así como los costos y beneficios de dichas estrategias. Dadas las numerosas y profundas incertidumbres que influyen en las emisiones, los costos y los beneficios, acoplamos SiSePuede con Robust Decision Making (RDM), un marco de referencia para gestionar incertidumbres profundas (Lempert, Popper y Bankes, 2003; Groves y Lempert, 2007; Kalra et al., 2015; Lempert et al., 2013). RDM es un proceso iterativo, apoyado por las partes interesadas, para llevar a cabo exhaustivos análisis "hipotéticos". Utilizando las técnicas de análisis de vulnerabilidad del RDM, evaluamos las estrategias bajo una serie de condiciones y supuestos alternativos para comprender la gama potencial de resultados y condiciones que llevan a las estrategias a cumplir o no los objetivos de descarbonización y económicos. Esta metodología ha tenido éxito en América Latina no sólo para la planificación de la descarbonización (Groves et al., 2020; Quirós-Tortós et al., 2021, Benavides et al., 2021; Arguello et al., 2022), sino también para la planificación resiliente del agua y el transporte ante las incertidumbres climáticas (Kalra et al., 2015; Groves et al., 2021; Molina-Perez et al., 2019; Olaya et al., 2020), y las políticas globales de sostenibilidad (Lempert et al., 2003; Molina-Perez et al., 2020).

En consonancia con el proceso de RDM, nuestro diseño experimental se basó en las aportaciones de los expertos sectoriales del BID. Los involucramos al inicio de nuestra investigación en una primera ronda de talleres sectoriales en los que nos orientaron sobre las transformaciones para lograr la descarbonización, los costos y beneficios de esas transformaciones, las incertidumbres que condicionarían los resultados y los datos y modelos disponibles para fundamentar nuestro análisis. Tras nuestro análisis preliminar, celebramos talleres sectoriales específicos para solicitar revisiones de nuestro diseño experimental y revisar los datos y los resultados. Revisamos nuestro análisis final basándonos en estos comentarios de los expertos.

Diseño de experimentos

Primero utilizamos SiSePuede para evaluar las emisiones en una trayectoria de Desarrollo tradicional en la que el desarrollo futuro de América Latina y el Caribe es una extrapolación de su trayectoria de desarrollo pasada. Es coherente con el desarrollo global tradicional de los siglos XIX y XX, que perseguía un crecimiento económico rápido y a menudo insostenible al tiempo que aumentaba la calidad de vida (Commoner, 2013). Esto incluye las siguientes tendencias:

- la creciente demanda de bienes y servicios asociada al aumento de la población y al crecimiento económico;
- más producción y consumo de carne roja y cambios en el transporte hacia más desplazamientos personales en automóvil asociados al aumento de la riqueza;
- la deforestación continua necesaria para crear más espacio para los cultivos y el ganado;
- aumentos de fondo de la eficiencia energética gracias a las mejoras tecnológicas; y
- un modesto aumento de las energías renovables, pero con una importante dependencia de los combustibles fósiles para producir electricidad y para la energía en toda la economía.

Es importante destacar que el Desarrollo tradicional no es ni debe interpretarse como una proyección de cómo se está desarrollando América Latina y el Caribe o cómo es probable que se desarrolle en el futuro. En aspectos importantes, es coherente con las tendencias regionales actuales. Por ejemplo, en su evaluación de Brasil a nivel de país, Climate Action Tracker señala que "Brasil está centrado en potenciar el uso de gas fósil en el suministro eléctrico para combatir la escasez de energía hidroeléctrica causada por las sequías de 2021, a pesar del rendimiento mucho más prometedor de otras tecnologías de energías renovables en el país, como la eólica y la solar" [énfasis añadido] (Climate Action Tracker, 2022a). Tiene sentido que los países de todo el mundo continúen siguiendo los patrones de desarrollo tradicionales, ya que existen muchas barreras que impiden un cambio rápido hacia la carbono-neutralidad, especialmente en los países en desarrollo (Fazekas et al., 2022). Sin embargo, también se están llevando a cabo nuevos esfuerzos para descarbonizar que alejan a la región de esa trayectoria de desarrollo tradicional (Iyer et al., 2017; BID, 2019).

La trayectoria de Desarrollo tradicional sirve, en cambio, como telón de fondo contrafactual sobre el que evaluar y comparar los efectos de más de 50 transformaciones diferentes en toda la economía que podrían reducir las emisiones, algunas de las cuales ya se están llevando a cabo o se han prometido. Para cada transformación, simulamos los efectos de las emisiones, los costos y los beneficios. Ordenamos estas transformaciones en tres categorías, cada una de las cuales representa un enfoque diferente del desarrollo y la descarbonización, tal y como se ha comentado en la introducción. La tabla 2.2 enumera estas transformaciones y su inclusión en cada una de las categorías.

A continuación, utilizamos SiSePuede para analizar hasta qué punto una implementación máxima de estas categorías de transformaciones puede llevarnos hacia la carbono-neutralidad bajo un conjunto de supuestos nominales, y qué tipos de costos y beneficios resultan. Esto ayuda a responder a preguntas como: "¿Cuánto podríamos descarbonizar sólo a través del aumento de la eficiencia, sin cambiar la estructura de producción o los patrones de consumo?" y "¿Cuáles son los costos y beneficios de cambiar la producción y el consumo de alimentos como parte de una estrategia de descarbonización?". También evaluamos todas las transformaciones en una estrategia de "Todas las acciones" para comprender cómo el máximo esfuerzo puede alcanzar las cero emisiones netas en 2050.

En la práctica, las estrategias de descarbonización de los países, incluidas sus NDC y sus LTS, implicarán transformaciones a diversos niveles de aplicación en función de los impactos, los costos, los beneficios, la disponibilidad tecnológica, la viabilidad política y otros obstáculos e impulsores de esas acciones. Nuestro siguiente conjunto de experimentos responde a la pregunta: "¿Qué transformaciones son los impulsores más importantes hacia la carbono-neutralidad?". Utilizamos el muestreo latin-hypercube para generar estadísticamente 1,000 estrategias de descarbonización que implementan cada transformación en diferentes grados, desde una implementación casi nula hasta un nivel máximo. Evaluamos cada una de estas estrategias bajo supuestos nominales sobre incertidumbres exógenas, y utilizamos el análisis de descubrimiento de escenarios para identificar los mayores impulsores y un nivel mínimo de implementación necesario para acercarse a emisiones netas cero.

Nuestro conjunto final de experimentos responde a las preguntas: "¿Qué combinación de transformaciones, con qué intensidades de aplicación, alcanza con mayor seguridad la carbono-neutralidad y los beneficios netos en medio de una profunda incertidumbre? ¿Y qué incertidumbres minan más la capacidad de alcanzar emisiones netas cero?".

Utilizamos el resultado del experimento anterior para aumentar el número de trayectorias que podrían alcanzar la carbono-neutralidad en condiciones de incertidumbre, con el fin de disponer de datos suficientes para el descubrimiento de escenarios. Es decir, generamos otras 1,000 estrategias de descarbonización, esta vez exigiendo el nivel mínimo de aplicación para las transformaciones críticas. También generamos 1,000 futuros, cada uno de los cuales representaba una combinación única de supuestos sobre impulsores de emisiones profundamente inciertos, efectos de transformación y costos y beneficios. En cada futuro, simulamos cada una de las 1,000 estrategias de descarbonización y la comparamos con el rendimiento del Desarrollo tradicional en ese mismo futuro para calcular costos y beneficios. Utilizando técnicas de descubrimiento de escenarios, identificamos las condiciones en las que las estrategias son vulnerables a no alcanzar los objetivos de cero emisiones netas, los objetivos de beneficios netos o ambos. Identificamos estrategias que alcanzan con solidez ambos objetivos.

La tabla 2.1 ofrece una visión general de los elementos clave del diseño experimental: las estrategias, las métricas de emisión y desarrollo, las incertidumbres y el marco de modelación. El resto de esta sección amplía cada uno de estos elementos del diseño.

El marco analítico de SiSePuede

SiSePuede es un modelo de simulación de emisiones de gases de efecto invernadero, costos y beneficios. Como se indica en la introducción, SiSePuede calcula las emisiones que se producen en cada sector basándose en los impulsores económicos y demográficos de la demanda y en las emisiones energéticas y no energéticas que resultan de satisfacer esas demandas. Nuestra aplicación es coherente con las guías del IPCC sobre inventarios de gases de efecto invernadero (IPCC 2006; 2019) y se basa en ellas. SiSePuede se implementa a nivel nacional, por lo que los resultados a nivel regional son la agregación de los resultados en cada uno de los 18 países enumerados en la Tabla 2.2. En el capítulo 5, presentamos los resultados detallados de tres países individuales, que ilustran las diferencias locales con respecto a los resultados agregados.

CAPÍTULO 2

Enfoque para evaluar las emisiones, los costos y los beneficios

Tabla 2.1 Resumen del diseño experimental de

| Métricas | Estrategias |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Potencial de calentamiento global (PCG) a 100 años de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) • Costos o ahorros técnicos <ul style="list-style-type: none"> ○ Costos de capital ○ Operaciones no relacionadas con el combustible y mantenimiento ○ Costos combustible ○ Costos de los insumos de otros sectores ○ Cambio en el valor añadido del sector ○ Costos de consumo • Costos o ahorros no técnicos <ul style="list-style-type: none"> ○ Calidad del aire, el suelo y el agua ○ Servicios ecosistémicos ○ Congestión del transporte y colisiones ○ Salud humana y productividad | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo tradicional • Las transformaciones de la tabla 2.1 al máximo de ejecución evaluadas en cuatro grupos: <ol style="list-style-type: none"> 1. Mejoras incrementales 2. Soluciones para el suministro 3. Cambiar el consumo 4. Todas las acciones (todas las anteriores) • 1.000 estrategias generadas estadísticamente que implican todas las transformaciones de la tabla 2.1, pero con distintos niveles de aplicación • 1.000 variantes generadas estadísticamente de una estrategia de "acciones críticas" que implican transformaciones críticas a niveles altos de aplicación y otras transformaciones a niveles modestos de aplicación. |
| Incertidumbres | Marco de modelado |
| <ul style="list-style-type: none"> • Incertidumbres de los impulsores <ul style="list-style-type: none"> ○ Demanda de producción o servicios de cada sector ○ Demanda de carne de vacuno, viajes en vehículos privados y otros consumos asociados al aumento de la riqueza ○ Aumento de la productividad o la eficiencia ○ Costos de combustible ○ Captura y emisiones asociadas a los usos de la tierra y al cambio de uso de la tierra • Incertidumbres sobre el efecto de las transformaciones en las emisiones <ul style="list-style-type: none"> ○ Eficacia de las intervenciones en fermentación entérica para reducir las emisiones • Costos y beneficios de las transformaciones <ul style="list-style-type: none"> ○ Costos técnicos ○ Grado o valor de las presentaciones no técnicas | <p>Marco analítico de SiSePuede</p> |

CAPÍTULO 2

Enfoque para evaluar las emisiones, los costos y los beneficios

Tabla 2.2 Lista y estadísticas clave a partir de 2020 de los países incluidos en el estudio

| País | Emisiones totales | | Emisiones totales, excluido el cambio de uso de la tierra | | Población | | PIB en US\$ corrientes | |
|----------------------|-----------------------|---------------|---|---------------|------------|---------------|------------------------|---------------|
| | (MtCO ₂ e) | (% del total) | (MtCO ₂ e) | (% del total) | (millones) | (% del total) | (miles de millones) | (% del total) |
| Brasil | 1,469.64 | 41.8 | 1,064.71 | 38.4 | 213 | 36.1 | 1,476 | 34.7 |
| México | 609.07 | 17.3 | 592.32 | 21.4 | 126 | 21.4 | 1,091 | 25.6 |
| Argentina | 394.76 | 11.2 | 361.43 | 13.0 | 45 | 7.6 | 386 | 9.1 |
| Colombia | 270.31 | 7.7 | 187 | 6.7 | 51 | 8.6 | 270 | 6.3 |
| Perú | 179.78 | 5.1 | 89.87 | 3.2 | 33 | 5.6 | 202 | 4.7 |
| Bolivia | 131.43 | 3.7 | 55.2 | 2.0 | 12 | 2.0 | 37 | 0.9 |
| Paraguay | 97.29 | 2.8 | 50.78 | 1.8 | 7 | 1.2 | 35 | 0.8 |
| Ecuador | 94.19 | 2.7 | 68.06 | 2.5 | 18 | 3.1 | 99 | 2.3 |
| Chile | 49.69 | 1.4 | 106.72 | 3.8 | 19 | 3.2 | 254 | 6.0 |
| Nicaragua | 38.15 | 1.1 | 18.45 | 0.7 | 7 | 1.2 | 13 | 0.3 |
| Guatemala | 36.78 | 1.0 | 33.17 | 1.2 | 17 | 2.9 | 78 | 1.8 |
| República Dominicana | 35.5 | 1.0 | 37.05 | 1.3 | 11 | 1.9 | 79 | 1.9 |
| Uruguay | 34.28 | 1.0 | 35.99 | 1.3 | 3 | 0.5 | 54 | 1.3 |
| Honduras | 27.67 | 0.8 | 21.15 | 0.8 | 10 | 1.7 | 24 | 0.6 |
| Panamá | 21.46 | 0.6 | 17.23 | 0.6 | 4 | 0.7 | 57 | 1.3 |
| El Salvador | 12.15 | 0.3 | 11.06 | 0.4 | 6 | 1.0 | 25 | 0.6 |
| Jamaica | 7.58 | 0.2 | 7.43 | 0.3 | 3 | 0.5 | 14 | 0.3 |
| Costa Rica | 7.08 | 0.2 | 14.41 | 0.5 | 5 | 0.8 | 62 | 1.5 |
| Total | 3,516 | | 2,772 | | 590 | | 4,256 | |

Notas: Datos de emisiones tomados de www.climatewatchdata.org y datos económicos tomados de <https://data.worldbank.org/>. PIB significa producto interior bruto; MtCO₂e significa toneladas métricas equivalentes de dióxido de carbono.

Enfoque SiSePuede de la contabilidad de emisiones, costos y beneficios

SiSePuede contabiliza las emisiones por gas en cada uno de los cuatro sectores clave de emisiones del IPCC: Agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU); Gestión de residuos (Economía circular); Energía; y Procesos industriales y uso de productos (IPPU), tal y como se describe en los apéndices técnicos. Sin embargo, para los fines de nuestra audiencia centrada en las políticas, volvemos a mapear estos subsectores en sectores relevantes para el diseño de política climática: Agricultura, silvicultura y uso del suelo; Transporte; Edificios; Industria (incluidas las emisiones procedentes tanto de la energía como de los procesos); Residuos; y Producción de energía. SiSePuede también cuenta con un quinto subsector socioeconómico para coordinar los impulsores compartidos entre los demás sectores. SiSePuede integra estos sectores pasando los resultados clave de un subsector a otro. Por ejemplo, la gestión del estiércol del ganado crea oportunidades para sustituir los fertilizantes sintéticos por estiércol en las tierras de cultivo y los pastos; el aumento del reciclaje modifica la producción industrial para reducir la demanda de materiales vírgenes; y el cambio de combustible en los subsectores energéticos conduce a cambios en la producción de combustible, incluso para la electricidad y el hidrógeno. La figura 2.1 describe cómo se interconectan cada uno de estos sectores políticos.

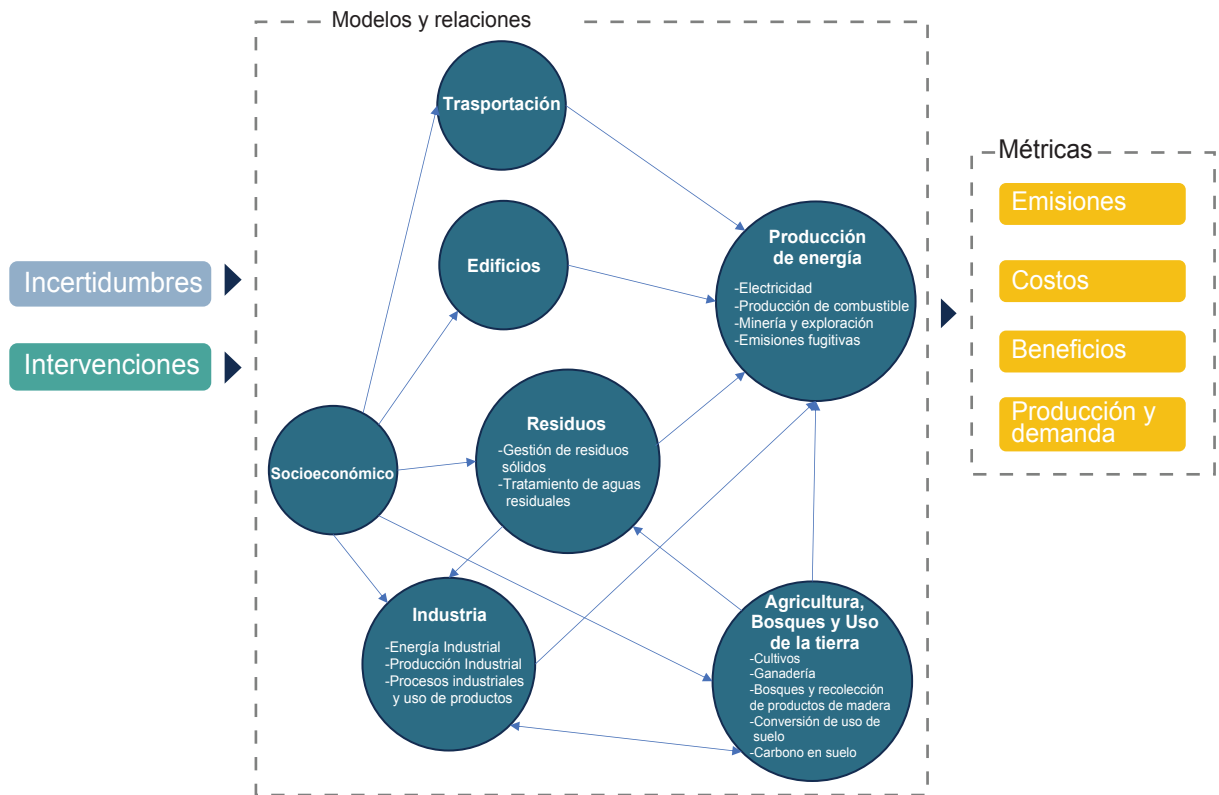


Figura 2.1. Marco conceptual de modelización de SiSePuede.

Para todas las transformaciones incluidas en SiSePuede, se especifican los costos de capital y operativos, así como los beneficios socioeconómicos monetizados. Los factores de referencia de los costos y beneficios sociales, medioambientales y económicos se basan en estimaciones encontradas en la bibliografía. Sin embargo, el marco está construido para permitir la exploración de la incertidumbre sobre estos factores de referencia. Además, para que el análisis sea más relevante para un conjunto más amplio de partes interesadas (por ejemplo, los ministerios de transporte o los departamentos de energía), los factores de costos y beneficios se estiman en las unidades naturales en las que se incurre (por ejemplo, el coste de la sustitución del clínker por tonelada de cemento producida, el coste de la gestión de las emisiones entéricas por cabeza de ganado y los servicios ecosistémicos ganados o perdidos por hectárea de bosque) en lugar de en costos por unidad de GEI emitido o reducido. Así pues, los costos y beneficios de las transformaciones dependen de su nivel de aplicación y despliegue a lo largo del tiempo.

SiSePuede contrasta con otros enfoques de modelización y los complementa

SiSePuede tiene varias ventajas sobre otros marcos de modelización para responder a las preguntas planteadas en este análisis. En primer lugar, SiSePuede está diseñado para evaluar las transformaciones a nivel subsectorial, abordando la necesidad de modelar las acciones para reflejar objetivos tangibles para los actores sectoriales y cuantificando al mismo tiempo los efectos en todo el sistema, incluidos los costos y beneficios sociales de esas acciones. En segundo lugar, SiSePuede se basa en las directrices de inventario y los códigos de emisiones del IPCC, lo que significa que es adecuado para compararlo con las NDC y otras cuentas de emisiones disponibles públicamente (incluyendo la FAO, Climate Watch [CAIT], la AIE y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC]). En tercer lugar, SiSePuede está construido sobre una plataforma escalable de código abierto y se basa en cálculos numéricos sencillos, lo que facilita una exploración sólida de estrategias para contextos nacionales específicos al permitir una exploración sustantiva sobre incertidumbres (factores impulsores, transformaciones y costos y beneficios) a niveles muy refinados (es decir, todos los sectores y todos los gases de efecto invernadero). En cuarto lugar, SiSePuede simula el impacto de más de 50 transformaciones sectoriales que las partes interesadas pueden ajustar en función de la rapidez y la intensidad de su aplicación en cada sector y país y combinarlas en diferentes carteras. Para todas las transformaciones, SiSePuede modela los costos de aplicación necesarios y los beneficios asociados para toda la economía. Por último, SiSePuede utiliza cientos de datos¹ recuperados de bases de datos públicas (es decir, FAO, Banco Mundial y OCDE) para captar las características de las naciones y de las transformaciones. Estos datos captan tanto los sectores formales como los informales. A continuación, cada nación se calibra con los datos históricos de 2015-2020 y se reescala para que coincida con su inventario de emisiones registrado en bases de datos internacionales, como Climate Watch, o según conste en sus archivos nacionales. objetivos de mitigación.

¹ Se estimaron y recuperaron 300 variables para el sector AFOLU, 73 para Economía Circular, 528 para Energía, 206 para Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU) y 13 para el módulo socioeconómico. Los metadatos y protocolos de procesamiento de esta base de datos pueden consultarse en https://github.com/milocortes/sisepuede_data.

Debido a la disponibilidad de datos, se utiliza 2020 como año inicial de las simulaciones. Esto no requiere un tratamiento especial de los impactos COVID19. Estos elementos permiten a SiSePuede reflejar el conjunto de recursos, restricciones y opciones que tienen los distintos países para cumplir sus

El enfoque centrado en la transformación sectorial de SiSePuede para modelizar las emisiones contrasta con otras técnicas de modelización habituales. Por ejemplo, algunos modelos integrados de evaluación (IAM) se utilizan para modelizar procesos biofísicos de emisiones impulsados por la actividad antropogénica, y algunos incluyen retroalimentaciones biofísicas. De acuerdo con las directrices de inventario del IPCC, SiSePuede basa las emisiones en factores de emisión que responden a impulsores, aunque ciertos fenómenos -como las emisiones de metano procedentes de la descomposición anaeróbica en vertederos de residuos sólidos, que se modela mediante un modelo de descomposición de primer orden- incluyen tratamientos biofísicos. Las retroalimentaciones biofísicas -como los impactos del cambio climático en la producción hidroeléctrica o los factores de rendimiento de los cultivos- se tratan como estresores exógenos que pueden explorarse dentro de unos rangos esperados razonables.

La relativa simplicidad numérica de los cálculos en SiSePuede y los marcos de incertidumbre integrados permiten una amplia exploración sobre incertidumbres a niveles muy refinados, lo que facilita una exploración robusta de las estrategias. SiSePuede endogeniza la exploración de la incertidumbre mediante el muestreo de hipercubos latinos a través de incertidumbres exógenas y efectos de intervención, un sistema robusto de gestión de datos y una arquitectura computacional escalable.

SiSePuede también difiere significativamente de los modelos de equilibrio general y parcial (GEM y PEM). Los modelos de equilibrio general, que endogenizan los precios en función de los factores de producción, son otra clase de modelos emparejados con factores de emisión para estimar cómo los cambios en la economía pueden impulsar cambios en las emisiones. Sin embargo, aunque los GEM endogenizan ventajosamente las demandas y los precios, pueden ser difíciles de calibrar y resolver, especialmente cuando se exploran grandes espacios de parámetros y variables, como los suministros y las demandas de una gama refinada de productos y servicios en toda una economía. Aunque SiSePuede no endogeniza precios y cantidades a través de equilibrios, sí facilita la exploración sobre combinaciones de precios y comportamientos que luego pueden utilizarse para identificar escenarios relevantes para las políticas a través de una gama de futuros potenciales.

Dejando a un lado estas diferencias, los resultados de los IAM u otros ejercicios de modelización global (por ejemplo, GCAM, MESSAGE-GLOBIOM y REMIND-MAgPIE) son comparables a los nuestros. Algunos de sus resultados también pueden utilizarse como entradas para SiSePuede. Por ejemplo, el PIB, la población y las trayectorias de emisiones de estos ejercicios de modelación pueden utilizarse en SiSePuede como entradas o como objetivos de calibración, lo que puede ser útil para desarrollar una comprensión más granular de las trayectorias de emisiones estimadas a través de los IAM.

El Apéndice A describe SiSePuede con más detalle.

Las limitaciones de SiSePuede

SiSePuede y los datos que se utilizaron en este análisis tienen algunas limitaciones importantes. En primer lugar, como se ha señalado, SiSePuede no endogeniza las señales del mercado ni los procesos de retroalimentación económica que podrían afectar a los costos, los beneficios y las demandas. Por ejemplo, a medida que las energías renovables se adopten más ampliamente, el precio de los combustibles fósiles podría bajar. Esto aumentaría la demanda de combustibles fósiles y disminuiría el ahorro de costos asociado al cambio a las renovables. Como otro ejemplo, SiSePuede simula el impacto de los cambios domésticos hacia dietas más sanas con menos carne roja. El impacto resultante sobre el gasto alimentario de los hogares se valora en función de los precios exógenos de los alimentos, aunque una disminución de la demanda de carne roja reduciría endógenamente los precios de la carne roja y alteraría esa estimación. Estas retroalimentaciones no se incluyen en el análisis. Sin embargo, los resultados de SiSePuede utilizarse en modelos económicos especializados para dar cuenta de tales impactos, así como de otros impactos macroeconómicos como los efectos laborales y los ingresos fiscales.

En segundo lugar, SiSePuede no contiene balances de masas interregionales para los bienes que se importan y exportan (por ejemplo, productos manufacturados, cultivos y/o ganado) y la energía (por ejemplo, el comercio de electricidad y combustibles).

En tercer lugar, nuestras transformaciones no distinguen entre aspectos informales y formales de los sectores (por ejemplo, edificios o gestión de residuos) y no diferencian los resultados geográficamente dentro de un país. Las estrategias de descarbonización a nivel nacional, sectorial y subnacional deberán incluir estos detalles.

En cuarto lugar, los datos utilizados para ejecutar SiSePuede procedían en su totalidad de fuentes públicas y abiertas. Los datos para muchos países eran limitados en estos conjuntos de datos, y se utilizaron muchas imputaciones para generar estimaciones para países que no tenían datos disponibles. En particular, no se disponía de datos a nivel de país para las matrices de transición del uso de la tierra. Para llenar este vacío, se desarrollaron transiciones exógenas del uso de la tierra utilizando un modelo de optimización que exploraba matrices potenciales que se alineaban con los datos de prevalencia del uso de la tierra encontrados en las bases de datos de la FAO. Futuras iteraciones podrían mejorar este enfoque integrando datos satelitales.

Estrategias y transformaciones

La tabla 2.3 resume las transformaciones evaluadas en el estudio por sector, subsector (si procede) y categoría. Para cada transformación, hemos identificado un efecto sobre las emisiones, costos y beneficios por unidad de aplicación, y un nivel máximo de aplicación para 2050 basado en nuestra revisión de la bibliografía. Estos se detallan en los apéndices técnicos. Muchas de estas transformaciones, si no la mayoría, son complejas de aplicar, ya que requieren tecnologías nuevas o diferentes, cambios normativos y de infraestructuras, financiación, cambios en la percepción y aceptación del público y otros muchos esfuerzos públicos y privados. Nuestra intención aquí no es simplificar en exceso ni pasar por alto las complejidades de la aplicación, sino analizar las emisiones potenciales, los costos y los beneficios de emprender una transformación concreta.

CAPÍTULO 2

Enfoque para evaluar las emisiones, los costos y los beneficios

Tabla 2.3 Transformaciones en mejoras incrementales, soluciones del lado de la oferta y cambios en el consumo categorías

| Sector | Subsector | Mejoras Incrementales | Lado de la oferta Soluciones | Cambiar consumo |
|--|----------------------------|--|---|---|
| Agricultura, bosques y otros usos de la tierra | Cultivos | <ul style="list-style-type: none"> • Reducir el uso excesivo de fertilizantes • Ampliar la agricultura • Mejorar el cultivo del arroz | | |
| | Ganadería | | <ul style="list-style-type: none"> • Reducir la fermentación entérica • Ampliar los sistemas silvopastoriles • Gestión del estiércol | |
| | Bosques y uso de la tierra | | | <ul style="list-style-type: none"> • Detener la deforestación |
| | Transversal | <ul style="list-style-type: none"> • Acelerar la productividad • Utilizar los aumentos de productividad para conservar la tierra | <ul style="list-style-type: none"> • Reducir las pérdidas en la cadena de suministro | <ul style="list-style-type: none"> • Inducir la forestación con un cambio en la producción agrícola y el consumo |
| Industria | Uso del material | <ul style="list-style-type: none"> • Cambio de insumos vírgenes a reciclados • Sustituir el clínker en el cemento | <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la eficiencia en el uso de materiales | |
| | Energía Industrial | <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la eficiencia energética | <ul style="list-style-type: none"> • Cambiar calor de baja temperatura a bombas de calor • Cambiar calor de alta temperatura a electricidad e hidrógeno | |
| | Otras reducciones | | <ul style="list-style-type: none"> • Reducir los gases fluorados • Reducir en N2O en la producción química • CCS para acero, cemento, productos químicos y plásticos | |
| Edificios | | <ul style="list-style-type: none"> • Aumentar la eficiencia energética de los electrodomésticos • Aumentar la eficiencia de la envolvente del edificio | <ul style="list-style-type: none"> • Cambio de combustible a bombas de calor | |

CAPÍTULO 2

Enfoque para evaluar las emisiones, los costos y los beneficios

| | | | | |
|-----------------------|--------------------------------|--|---|---|
| Transporte | Combustibles y vehículos | <ul style="list-style-type: none">• Aumentar la eficiencia energética del transporte | <ul style="list-style-type: none">• Cambio de combustible transporte por carretera medio y pesado• Electrificar el ferrocarril | <ul style="list-style-type: none">• Electrificar el transporte ligero por carretera |
| | Cambio modal y ocupación | | <ul style="list-style-type: none">• Cambio modal para el transporte de carga | <ul style="list-style-type: none">• Aumentar la ocupación de los vehículos privados• Cambiar el modo de desplazamiento de los pasajeros locales hacia el transporte público y no motorizado• Cambio modal de los viajes regionales de pasajeros hacia el autobús y el ferrocarril |
| Producción de energía | | <ul style="list-style-type: none">• Reducir las pérdidas de transmisión | <ul style="list-style-type: none">• Producir electricidad con energías• Producir hidrógeno con energías renovables• Repare las fugas de emisiones fugitivas• Quemar en antorcha (en lugar de ventilar) las emisiones fugitivas que no se pueden capturar | |
| Residuos | Saneamiento y aguas residuales | <ul style="list-style-type: none">• Saneamiento seguro universal• Tratar las aguas residuales | <ul style="list-style-type: none">• Recuperar energía del tratamiento de aguas residuales | |
| | Solid waste management | <ul style="list-style-type: none">• Expand waste collection and end open dumping/burning• Divert waste to recyclables | <ul style="list-style-type: none">• Aumentar la captura y el uso de biogas en digestores y vertederos | <ul style="list-style-type: none">• Reducir el desperdicio alimentario de los consumidores• Desviar la materia orgánica al compostaje o a digestores |

Métricas de emisiones, costos y beneficios

Evaluamos el rendimiento de todas las estrategias en tres dimensiones generales:

1. Emisiones de GEI con un Potencial de Calentamiento Global (PCG) de 100 años coherente con el Acuerdo de París (Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2015). Las emisiones de GEI incluyen una amplia gama de gases, por ejemplo, las emisiones de CO₂ procedentes de la producción de electricidad, las de N₂O procedentes de la producción de cemento, las de metano (CH₄) procedentes de la fermentación entérica y las de gases fluorados procedentes de la producción de productos químicos.
2. Costos o beneficios técnicos, que generalmente experimentan los actores de un sector y también suelen ser internos a los mercados. Incluyen los gastos y ahorros de capital, operativos, de mantenimiento y relacionados con el combustible, así como los cambios en el valor añadido de los distintos sectores o subsectores.
3. Costos o beneficios no técnicos que son esenciales para el desarrollo económico y el bienestar humano, pero que generalmente corresponden a agentes no sectoriales y/o pueden ser totalmente externos al mercado.

La tabla 2.4 presenta un resumen de los costos y beneficios de las transformaciones en los distintos sectores. Los apéndices A a G ofrecen detalles adicionales sobre cada uno de estos parámetros de rendimiento, costos y beneficios.

Incertidumbres exógenas

Los efectos, costos y beneficios de muchas transformaciones son profundamente inciertos. Para abordar la incertidumbre, se evaluaron los resultados de las estrategias en 1.000 futuros diferentes para identificar las condiciones en las que podrían no alcanzar los objetivos económicos o de emisiones. Cada futuro se generó con una combinación de tres tipos de incertidumbres:

1. *Incertidumbres sobre los impulsores de las emisiones*, que controlan la demanda de bienes y servicios y los factores técnicos o medioambientales que determinan la intensidad de las emisiones al producir esos bienes y servicios. Algunos ejemplos son la demanda de carne roja en la dieta de los consumidores, la demanda de transporte, la producción de residuos, las mejoras de productividad en la agricultura y la capacidad de secuestro de los distintos tipos de bosques.
2. *Incertidumbres sobre los efectos* de las transformaciones, que determinan la eficacia de las transformaciones sectoriales en la reducción de las emisiones. Algunos ejemplos de estas incertidumbres son el efecto que tienen la agricultura de conservación y el cultivo del arroz en la reducción de emisiones del sector agrícola, el efecto que tiene la gestión de la fermentación entérica en la reducción de emisiones del ganado, o la medida en que las inversiones en transporte público harían que la gente se pasara al transporte público en lugar de a los vehículos privados.

3. *Las incertidumbres sobre los costos de transformación* incluyen factores que determinan el coste y los beneficios de las distintas transformaciones, como los costos del combustible, los costos de producción de las energías renovables, el valor económico de las externalidades de la salud humana y la contaminación, y el valor de los servicios de los ecosistemas.

La tabla 2.5 describe detalladamente los factores incluidos en cada grupo. Una preocupación clave para los responsables políticos será cómo y con qué eficacia pueden aplicarse las distintas transformaciones. Sin embargo, para los objetivos de este estudio de comprender los efectos de la transformación, tratamos el nivel de aplicación de cada transformación como una palanca política y no como una incertidumbre exógena.

Descontamos los costos y beneficios futuros utilizando una tasa de descuento fija del 7%, una tasa que se encuentra en el límite superior del rango de valores de la evaluación de mitad de siglo de las carteras de política climática (Emmerling, et al., 2019). No exploramos por encima de la tasa de descuento en los experimentos de incertidumbre porque, en este estudio, la tasa de descuento no tiene un impacto ordinal en los resultados, ya que la aplicación y el calendario de las transformaciones se especifican de forma exógena. Así, la tasa de descuento afectaría a la magnitud de los costos y beneficios, pero no cambiaría el arco de nuestras conclusiones. En otros estudios en los que la respuesta de la política climática se modela como una respuesta óptima a los daños inducidos por el cambio climático, la magnitud de la tasa de descuento influye en el calendario y la intensidad de las políticas a lo largo del tiempo. Aunque existe un debate entre los especialistas en clima sobre el valor adecuado de la tasa de descuento (por ejemplo, Sterner, 2008; Nordhaus, 2007), estudiantes recientes muestran que en un contexto de profunda incertidumbre, otros parámetros como la tasa de cambio tecnológico y la sensibilidad climática tienen un impacto significativamente mayor en las trayectorias de mitigación (Molina-Pérez, 2016).

Tabla 2.4 Costos y beneficios de la transformación por sectores

| Sector | Costos y beneficios técnicos | Costos y beneficios no técnicos |
|--|---|--|
| Agricultura, bosques y otros usos de la tierra | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de inversión de las transformaciones • Valor de los insumos agrícolas, como el combustible y los fertilizantes • Valor de la producción agrícola (cultivos y ganado producidos) • Coste técnico de la reforestación | <ul style="list-style-type: none"> • Lixiviación de nitratos y escorrentía de fertilizantes • Beneficios para la salud del suelo de la agricultura de conservación • Servicios ecosistémicos de los bosques • Salud humana y productividad de dietas mejores |
| Industria | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de inversión de las transformaciones • Ahorro en el mantenimiento de las transformaciones, por ejemplo, por el menor mantenimiento de las bombas de calor • Valor de los insumos industriales, como el combustible • Valor de la producción industrial | <ul style="list-style-type: none"> • Cambios en la calidad del aire por la energía y la producción industriales |
| Edificios | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de inversión de las transformaciones • Ahorro en el mantenimiento de las transformaciones, por ejemplo, por el menor mantenimiento de las bombas de calor | <ul style="list-style-type: none"> • <i>No evaluamos los beneficios y costos no técnicos de los edificios, como la calidad del aire interior.quality.</i> |
| Transporte | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de inversión de las transformaciones • Coste del sistema de prestación de servicios de transporte • Ahorro en mantenimiento, por ejemplo, por el menor mantenimiento de los vehículos eléctricos • Valor de los insumos de transporte, como el combustible | <ul style="list-style-type: none"> • Repercusiones sanitarias del cambio en la calidad del aire • Impactos en la salud y la productividad de las colisiones evitadas • Impactos de la congestión en la productividad |
| Producción de energía | <ul style="list-style-type: none"> • Gastos de capital y de explotación de la producción de electricidad • Coste de los combustibles utilizados para producir electricidad y otros • Coste de inversión de otras transformaciones | <ul style="list-style-type: none"> • Beneficios para la salud de evitar la contaminación atmosférica |
| Residuos | <ul style="list-style-type: none"> • Costos técnicos de las transformaciones • Valor de la recuperación de energía | <ul style="list-style-type: none"> • Repercusiones sanitarias del saneamiento seguro universal • Impactos sanitarios y medioambientales del fin de los vertidos a cielo abierto • Impactos del tratamiento de aguas residuales en la calidad del agua |

CAPÍTULO 2

Enfoque para evaluar las emisiones, los costos y los beneficios

Tabla 2.5. Incertidumbres

| Sector | Incertidumbres sobre los impulsores de las | Incertidumbres sobre el efecto de transformación | Incertidumbres sobre los costos de transformación |
|--|--|--|--|
| Transversal | | | <ul style="list-style-type: none"> • Costos de combustible <ul style="list-style-type: none"> o Renovables o Combustibles fósiles o Hidrógeno • Costos de producción de electricidad renovable (batería y producción) • Valor de las externalidades de salud humana • Valor de las externalidades de la contaminación medioambiental |
| Agricultura, bosques y otros usos de la tierra | <ul style="list-style-type: none"> • Variación anual de la productividad agrícola y ganadera • Demanda global de productos agrícolas • La demanda de carne de vacuno en la dieta en función de la riqueza, que impulsa la deforestación • Emisiones y secuestro de diferentes usos de la tierra • Emisión de la conversión del uso de la tierra | <ul style="list-style-type: none"> • Efecto de la agricultura de conservación y el cultivo del arroz • Efecto de las intervenciones de fermentación entérica | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de las transformaciones • Beneficio de las transformaciones • Valor de los servicios ecosistémicos |
| Transporte | <ul style="list-style-type: none"> • Demanda de transporte • Demanda de viajes en coche/aire | | <ul style="list-style-type: none"> • Coste del transporte por modo |
| Industria | <ul style="list-style-type: none"> • Demanda de producción industrial | <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de sustitutos del clínker | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de las mejoras de eficiencia • Coste de los sustitutos del clínker |
| Edificios | <ul style="list-style-type: none"> • Demanda de calefacción/refrigeración | | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de las mejoras de eficiencia |
| Producción de electricidad y energía | <ul style="list-style-type: none"> • Productividad de la energía hidroeléctrica | | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de transmisión • Coste de la reducción de las emisiones fugitivas |
| Residuos | <ul style="list-style-type: none"> • Producción de residuos | | <ul style="list-style-type: none"> • Coste de las infraestructuras de saneamiento y residuos |

Costos y beneficios de lograr
la carbono-neutralidad en
América Latina y el Caribe

3

CAPÍTULO

**Comprender los efectos de las
transformaciones en la descarbonización
y el desarrollo**

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

En este capítulo, analizamos la descarbonización y el potencial económico de la región. Evaluamos las emisiones, los costos y los beneficios de las distintas categorías de transformaciones en relación con una trayectoria de Desarrollo tradicional. El análisis utiliza valores nominales para cada variable incierta y asume que cada transformación se aplica a su máximo nivel potencial. El capítulo 4 explora los efectos de las transformaciones en condiciones de incertidumbre y con distintos niveles de aplicación.

Emisiones bajo una trayectoria de Desarrollo tradicional

Bajo una trayectoria de Desarrollo tradicional, es decir, despreocupada por la descarbonización, estimamos que las emisiones aumentarían en América Latina y el Caribe en un 70%, pasando de 4,1 GtCO₂e en 2020 a 6,9 GtCO₂e en 2050 (ver Figura 3.1). Este aumento está impulsado por el crecimiento previsto de la población y del PIB, que se traduce en una mayor actividad en general y en un cambio en la estructura de esa actividad asociado al aumento de la riqueza. Esto incluye, por ejemplo, un cambio hacia más desplazamientos en automóviles privados y más producción y consumo de carne de vacuno, con la consiguiente deforestación. Estas tendencias se ven contrarrestadas por el aumento de la eficiencia energética y de la productividad gracias a la mejora de la tecnología, y por un modesto incremento del uso de energías renovables para la producción de electricidad.

Exploración de las emisiones, costos y beneficios de las transformaciones

Con el telón de fondo del Desarrollo tradicional, evaluamos las emisiones y el efecto económico de las transformaciones, algunas de las cuales ya están en marcha en la región. Primero examinamos los efectos de aplicar al máximo cada categoría de transformación -mejoras incrementales, soluciones del lado de la oferta y cambios en el consumo- y después de aplicar al máximo todas las transformaciones simultáneamente. Esto ayuda a explorar estas cuestiones ¿Hasta dónde pueden las mejoras incrementales por sí solas llevar a la región hacia sus objetivos de descarbonización y desarrollo? ¿Son necesarios cambios estructurales en la economía para alcanzar la carbono-neutralidad? ¿Cómo se comparan los costos y beneficios de estos enfoques? ¿Cuáles son los efectos de aplicar al máximo todas las acciones? Estos resultados utilizan hipótesis nominales para todas las incertidumbres exógenas.

Cuatro figuras ilustran nuestras conclusiones. La figura 3.2 muestra la trayectoria de las emisiones bajo cada categoría de transformaciones junto a las emisiones bajo el Desarrollo tradicional (mostradas solas en la figura 3.1). Las emisiones se desglosan por sectores y las emisiones netas de CO₂e se indican con una línea azul continua. Los valores inferiores a cero indican emisiones negativas, es decir, secuestro y compensaciones. La figura 3.3 muestra el uso de la tierra por tipo en cada categoría a lo largo del tiempo. Las tendencias de esta figura ayudan a explicar algunos de los resultados de las emisiones, ya que la conservación de los bosques primarios y la expansión de los bosques secundarios desempeñan un papel fundamental en las emisiones y el desarrollo de la región.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran los costos y beneficios de cada una de las cuatro categorías de transformaciones en relación con el desarrollo tradicional durante el periodo 2025-2050 en dólares estadounidenses de 2019. La figura 3.4 muestra los beneficios nominales no descontados en incrementos de 5 años, mientras que la figura 3.5 muestra el valor actual neto de estos beneficios utilizando una tasa de descuento del 7%.

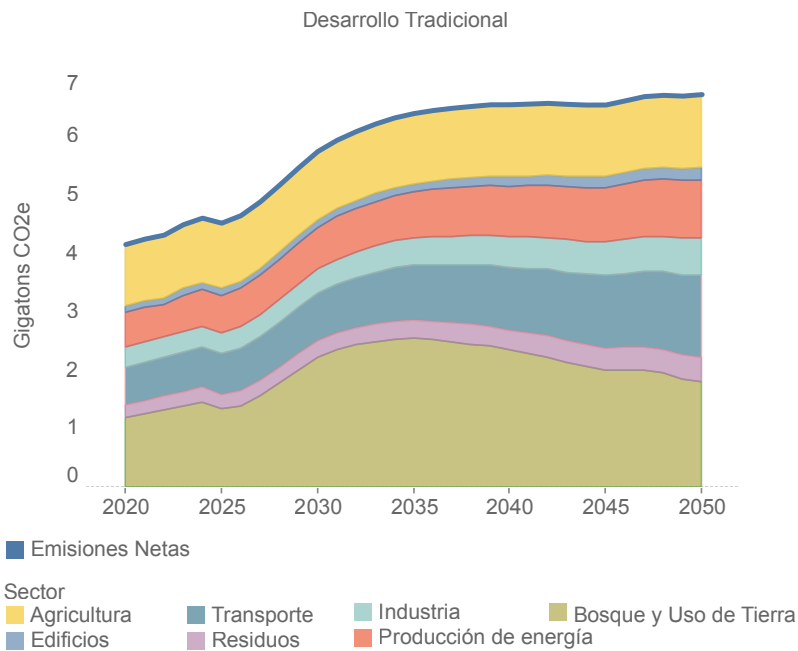


Figura 3.1 Emisiones según el Desarrollo tradicional.

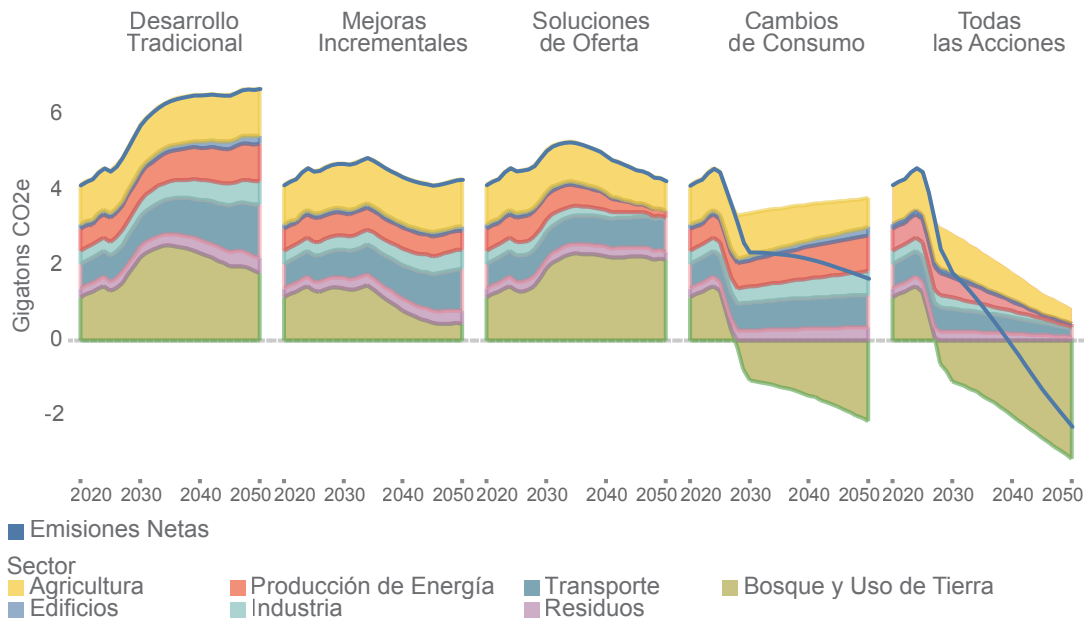


Figura 3.2 Emisiones con la aplicación máxima de transformaciones por categoría.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

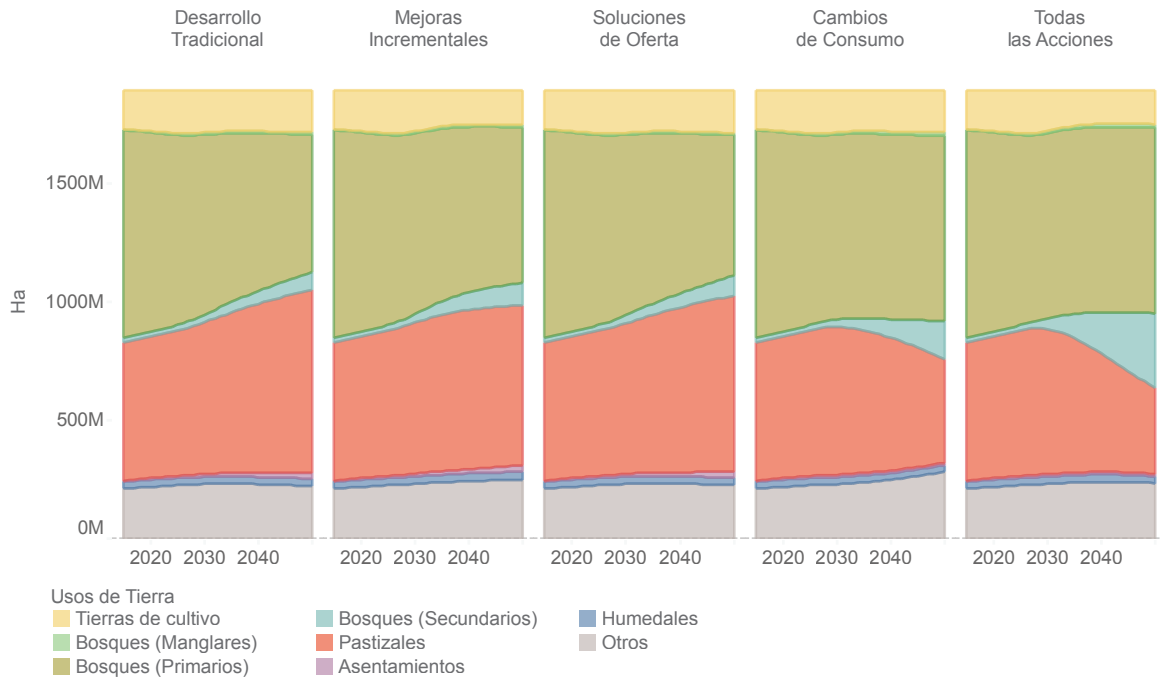
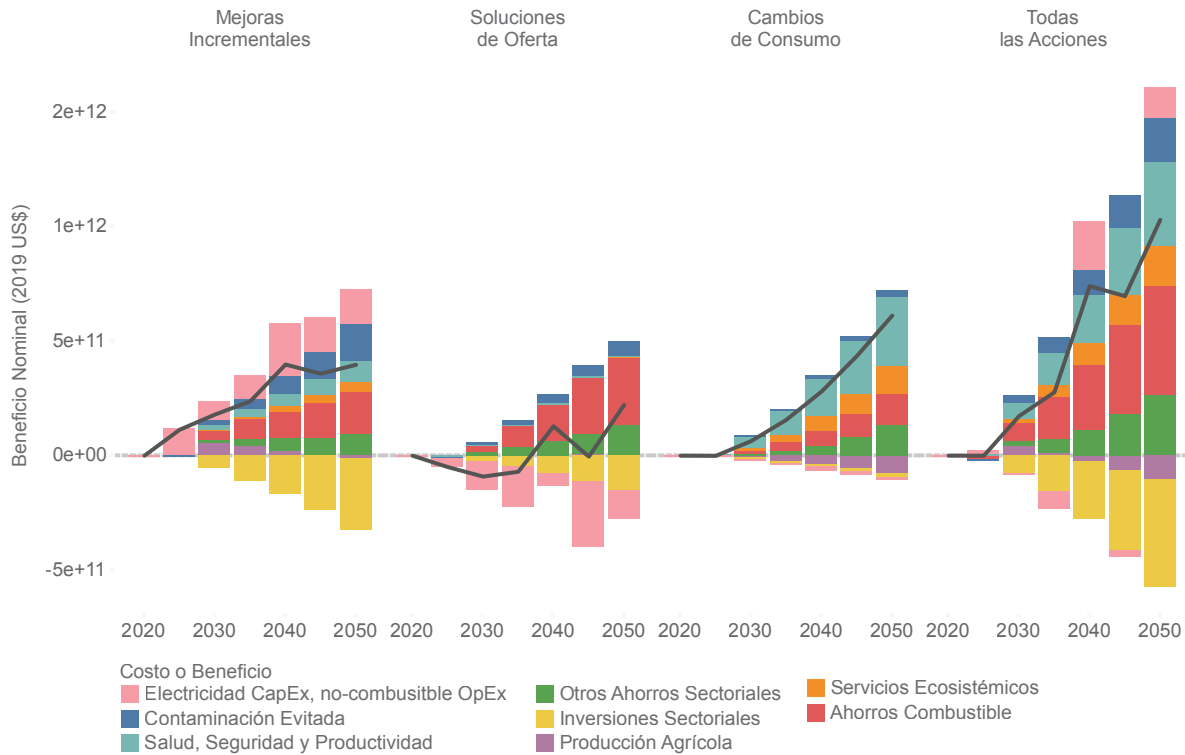


Figura 3.3 Utilización de la tierra en hectáreas (ha) bajo la aplicación máxima de transformaciones por categoría.

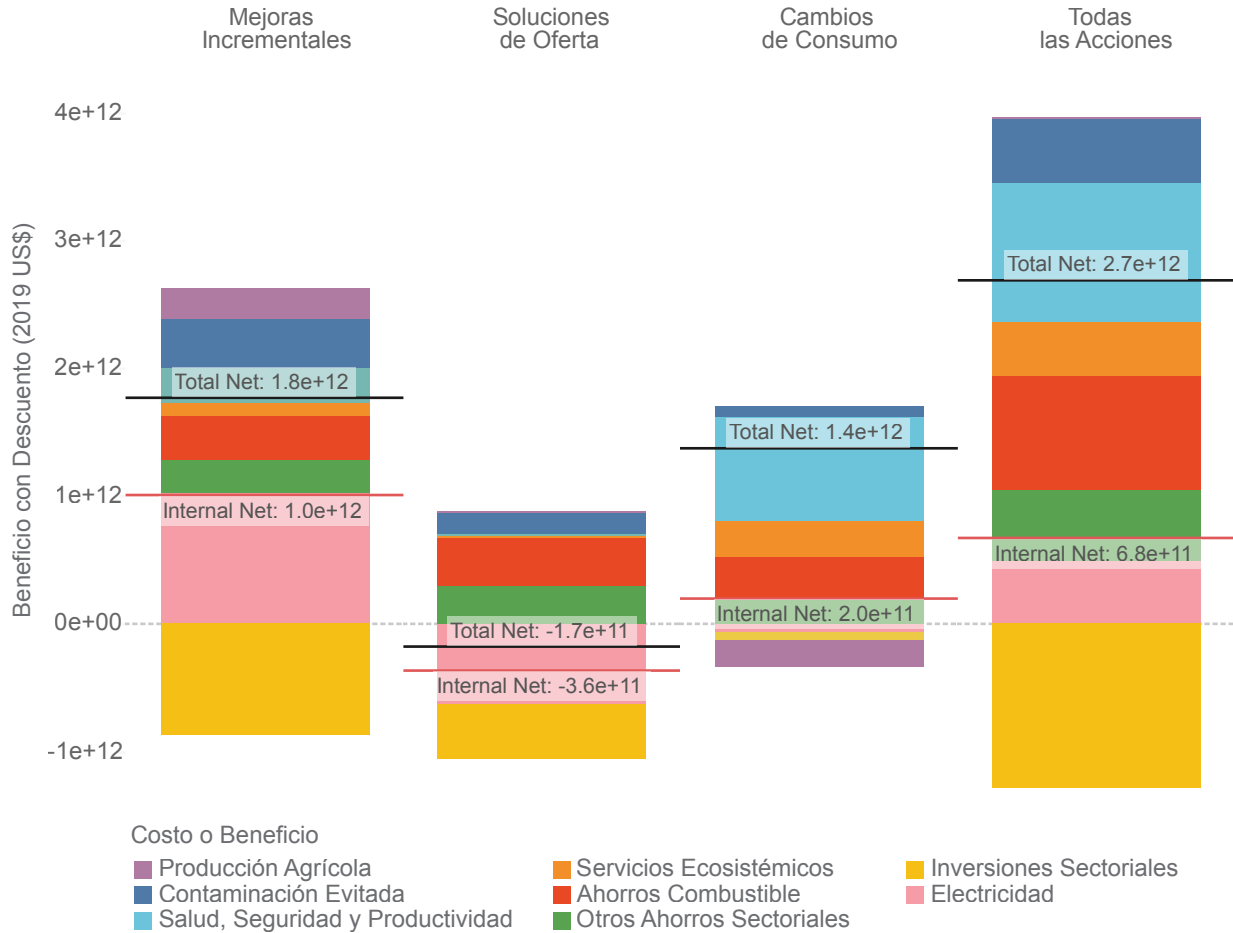


Nota: Esta figura muestra los beneficios anuales en cortes temporales de 5 años en cada categoría de transformaciones, en comparación con un futuro bajo el Desarrollo tradicional. Estos beneficios no están descontados y los beneficios negativos implican costos. La línea negra muestra el beneficio neto en todas las categorías.

Figura 3.4 Costos y beneficios nominales en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo



Nota: Esta figura muestra el valor actual de los costos y beneficios en cada categoría de transformaciones, en comparación con un futuro bajo Desarrollo tradicional. Estos beneficios están descontados al 7%, y los valores negativos implican costos. La línea negra muestra el valor neto de todos los costos y beneficios; las líneas rojas etiquetadas muestran el valor neto de los costos y beneficios en los que incurren los actores del sector y excluyen los costos y beneficios difíciles de valorar (y en gran medida externos) de la salud, la seguridad y la productividad; la contaminación evitada; y los servicios de los ecosistemas.

Figura 3.5 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías.

Maximizar las mejoras incrementales

La aplicación máxima de las transformaciones en las mejoras incrementales reduce las emisiones en 2050 en un 36% hasta 4,5 GtCO₂e. Los beneficios derivados de maximizar la eficiencia y la productividad reducen significativamente las emisiones en todos los sectores, incluso en la agricultura, donde los aumentos de productividad reducen las necesidades de uso de la tierra, que se dirigen a frenar la deforestación y aumentar los bosques secundarios. Sin embargo, las reducciones no son suficientes y siguen existiendo emisiones residuales significativas en todos los sectores. Simultáneamente, la deforestación continuada (aunque más lenta) (véase la Figura 3.3) significa que el sector del uso de la tierra y la silvicultura sigue siendo un emisor neto y no el sumidero que la región necesita que sea para compensar esas emisiones residuales (Dumas et al., 2022).

Aunque lejos de alcanzar el cero neto, las mejoras incrementales ofrecen unos beneficios netos significativos en las economías de la región de aproximadamente 1,8 billones de dólares, una vez descontados los costos de inversión técnica en eficiencia energética, productividad y eficiencia agrícola e infraestructuras cívicas básicas (saneamiento, gestión de residuos y tratamiento de aguas residuales). Hay dos efectos en juego. En primer lugar, el aumento de la productividad agrícola se traduce en una mayor producción agrícola a corto plazo que con el desarrollo tradicional, al tiempo que frena la deforestación y proporciona beneficios en los servicios ecosistémicos (véase la figura 3.4). En segundo lugar, el aumento de la eficiencia energética se traduce en un ahorro significativo en costos energéticos evitados en toda la economía. El aumento de la eficiencia energética significa que América Latina y el Caribe puede gastar menos en nueva y costosa capacidad de producción de electricidad de lo que gastaría en caso contrario. La producción y el consumo de energía evitados tienen beneficios posteriores en términos de un aire más limpio. Las inversiones en saneamiento y gestión de residuos reducen la contaminación y ofrecen beneficios para la salud humana, la seguridad y la productividad.

Maximizar las soluciones del lado de la oferta

Maximizar las transformaciones en las Soluciones del Lado de la Oferta reduce las emisiones a 4,4 Gt CO₂e en 2050, una reducción del 36% respecto a 2050. (Que las Soluciones del Lado de la Oferta y las Mejoras Incrementales conduzcan a una reducción similar de las emisiones es una coincidencia involuntaria porque tienen transformaciones totalmente diferentes). Estas reducciones son el efecto combinado del cambio a electricidad e hidrógeno en toda la economía y de la producción simultánea de electricidad e hidrógeno casi en su totalidad con energías renovables. Además, las reducciones de las emisiones industriales se consiguen capturando las emisiones de los procesos en determinadas industrias y destruyendo los gases F y el N₂O especialmente potentes. A pesar de estos avances, la agricultura y los cambios en el uso de la tierra siguen siendo grandes emisores, ya que sus emisiones no se deben principalmente al uso de la energía, sino a los procesos biológicos de la ganadería y la producción de cultivos y a la deforestación que inducen. Estas emisiones sólo pueden reducirse en parte con soluciones tecnológicas para la fermentación entérica y la gestión del estiércol del ganado.

Por sí solas, las transformaciones de las Soluciones del Lado de la Oferta suponen un costo neto. Mientras que las Mejoras Incrementales reducen el costo de la producción de electricidad al disminuir la demanda global mediante medidas de eficiencia, las Soluciones del Lado de la Oferta requieren una mayor producción de electricidad debido al cambio de combustible en toda la economía y a la realización de grandes inversiones para producir electricidad renovable e hidrógeno. Esto requiere una mayor capacidad, almacenamiento, transmisión y otras inversiones. El cambio de combustible también implica importantes costos de inversión que sólo se recuperan en parte con otros ahorros del sector.

Las soluciones del lado de la oferta también ofrecen cobeneficios sociales y medioambientales menores que las transformaciones en las mejoras incrementales. Muchas transformaciones -como la destrucción de gases F y N₂O en la industria y la reducción de la fermentación entérica- no tienen cobeneficios sociales y medioambientales aparte de la reducción de emisiones.

Maximizar los cambios en el consumo

Las transformaciones en el cambio del consumo logran mayores reducciones a través de unas pocas estrategias clave. Los cambios en la producción y el consumo de alimentos y los cambios en el consumo de transporte se combinan con una disminución de la deforestación para reducir las emisiones a 1,9 GtCO₂e en 2050. Esto supone una reducción del 73% en comparación con el desarrollo tradicional. Y lo que es aún más importante, detener la deforestación y cambiar la producción y el consumo de carne a cultivos deja espacio para la forestación secundaria, convirtiendo los bosques y el uso de la tierra de importantes emisores netos a secuestradores netos. Esto es esencial para compensar las emisiones residuales y alcanzar la carbono-neutralidad. Sin embargo, esta categoría de transformaciones hace poco por reducir las emisiones en otros sectores y, por tanto, las emisiones residuales son demasiado elevadas para compensarlas con mejoras en los bosques y el uso de la tierra.

Estas transformaciones ofrecen beneficios netos significativos, principalmente de tipo social y medioambiental, como 75,000 millones de dólares en costos de contaminación evitados gracias a la mejora del transporte y la gestión de residuos; 800,000 millones de dólares en otros costos de salud, seguridad y productividad evitados, incluyendo el ahorro de los hogares gracias a dietas más sanas y al desperdicio de alimentos evitado y la congestión y los costos de colisión evitados gracias a los cambios en el transporte; y 290,000 millones de dólares en servicios ecosistémicos gracias a los bosques primarios conservados y a los nuevos bosques secundarios.

El ahorro en costos de combustible y otros costos técnicos, principalmente derivados de la transformación del transporte, conlleva beneficios adicionales. En esta estrategia, el cambio modal de transporte de pasajeros produce importantes ahorros económicos, ya que a menudo cuesta menos transportar a las personas en transporte público que en automóvil privado (Jakob, 2006), aunque los costos son asumidos de forma diferente por el sector privado y el público.

Las transformaciones también suponen algunos costos, en términos de producción de electricidad para satisfacer una mayor demanda de electricidad (60,000 millones de dólares); el coste no percibido de la producción agrícola (185,000 millones de dólares); y los costos de inversión técnica de, por ejemplo, la electrificación del transporte (70,000 millones de dólares), pero los costos totales son muy inferiores a los beneficios totales.

La conclusión general es que, aunque cada una de estas categorías de transformaciones puede lograr reducciones significativas, incluso con una aplicación máxima, ninguna se acerca a cero emisiones netas porque cada una centra las transformaciones sólo en una parte del marco ASIF. En su lugar, es necesario un enfoque de toda la economía que transforme las actividades, la estructura y la intensidad para alcanzar las emisiones netas cero.

Maximizar Todas las acciones

La trayectoria Todas las acciones pone en práctica todas las transformaciones para lograr un enfoque de descarbonización de toda la economía y proporciona una idea de la reducción de emisiones y del potencial económico de la región. La carbono-neutralidad se alcanza en 2040

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

cuando todas las transformaciones se aplican con el máximo efecto. Esto minimiza simultáneamente las emisiones de cada sector económico (industria, transporte, residuos, edificios y producción de energía) y realiza cambios en la producción ganadera y el uso de la tierra para detener la deforestación y acelerar la reforestación lo suficiente como para compensar cualquier emisión residual de todos los sectores. A pesar de las importantes barreras políticas, financieras, logísticas, normativas y de otro tipo, esto sugiere que llegar a cero emisiones netas en 2050 puede estar al alcance de la mano en América Latina y el Caribe. Con 2,7 billones de dólares, los beneficios netos de Todas las acciones son también muy superiores a los de cualquiera de las tres categorías por separado, lo que sugiere que no sólo es mejor para las emisiones un enfoque que abarque toda la economía, sino que también es mejor para el desarrollo. La figura 3.6 muestra las emisiones y los beneficios netos en 2050 para cada categoría de transformación.

Por ejemplo, las emisiones del sector eléctrico pueden eliminarse cambiando únicamente a las energías renovables, como en el caso de las Soluciones del lado de la oferta, pero este enfoque tiene un costo elevado para el sector (véanse las barras rosas de la Figura 3.5). Aumentando simultáneamente la eficiencia energética (como en las Mejoras incrementales) y cambiando a las renovables (como en las Soluciones del lado de la oferta), Todas las acciones muestran que el sector puede reducir las emisiones en un 95% con un beneficio neto en comparación con un escenario de desarrollo tradicional, incluso aunque la demanda total de electricidad aumente por el cambio de combustible a electricidad en toda la economía.

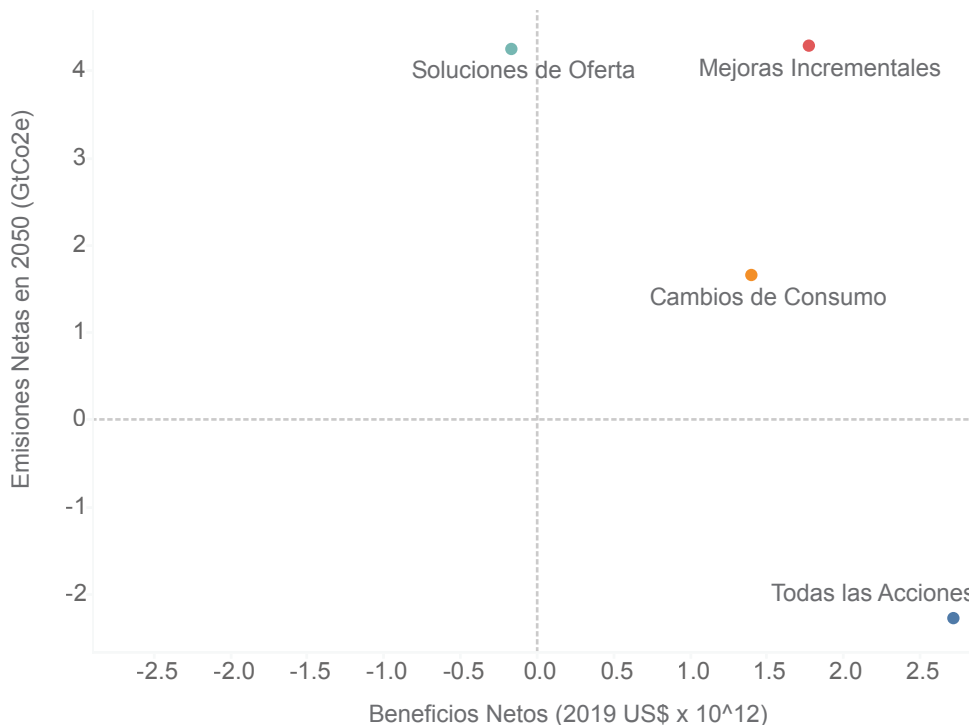


Figura 3.6 Beneficios netos frente a emisiones netas en 2050 con la aplicación máxima de las transformaciones por categorías.

Del mismo modo, Todas las acciones también alcanzan las emisiones netas cero sin afectar al valor total de la producción agrícola (barras moradas en la figura 3.5). En el marco de las mejoras incrementales, el aumento de la productividad agrícola induce un incremento del valor de la producción agrícola, principalmente de los cultivos. (El aumento de la productividad ganadera se redirige en parte a frenar la deforestación). Esto reduce la conversión del uso de la tierra pero no hace que los bosques y el uso de la tierra vuelvan a ser secuestradores netos. Por el contrario, en Cambiar el consumo se producen grandes reducciones de las emisiones agrícolas, principalmente por la renuncia a la producción ganadera, pero esto va acompañado de una pérdida significativa del valor de la agricultura. Cuando se combinan, el valor del aumento de la producción agrícola compensa el valor de la producción ganadera sacrificada, sin ningún efecto neto. Este hallazgo confirma la pertinencia de una estrategia de descarbonización centrada en aumentar drásticamente el rendimiento ganadero, moderar el crecimiento de la demanda de carne y garantizar que la tierra ahorrada se destine al ahorro de tierras y a la restauración de los ecosistemas (Searchinger et al., 2019; Dumas et al., 2022). También sugiere que la descarbonización de la agricultura justifica que se preste atención al cambio de actividad del sector y que una cuestión clave para los gobiernos es gestionar los efectos distributivos de las acciones de descarbonización en lugar de gestionar una pérdida global de valor en el sector.

Estos fenómenos merecen un examen más detallado de los efectos sectoriales. En la Figura 3.7 se comparan las emisiones producidas en cada sector en 2020 bajo el Desarrollo tradicional y Todas las acciones, con la Agricultura separada de los Bosques y Otros Usos de la Tierra. Obsérvese que las emisiones de la producción de electricidad y combustibles se contabilizan en el sector de Producción de Energía. Los mayores cambios (-4,9 GtCO₂e) se producen en Bosques y uso de la tierra, donde la detención de la deforestación y la expansión de los bosques secundarios hacen que el sector pase de ser el mayor emisor de la región a convertirse en un sumidero aún mayor. En los demás sectores, las mayores reducciones absolutas proceden de los otros tres mayores sectores emisores: el transporte (-1,2 GtCO₂e), la agricultura (-0,8 GtCO₂e) y la industria (-0,6 GtCO₂e). En porcentaje, sin embargo, las mayores reducciones proceden de los edificios (100%) y la industria (94%), ya que se pasan a la electricidad y el hidrógeno verde, y de la producción de energía (96%), donde la electricidad y el hidrógeno se producen casi en su totalidad con energías renovables.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

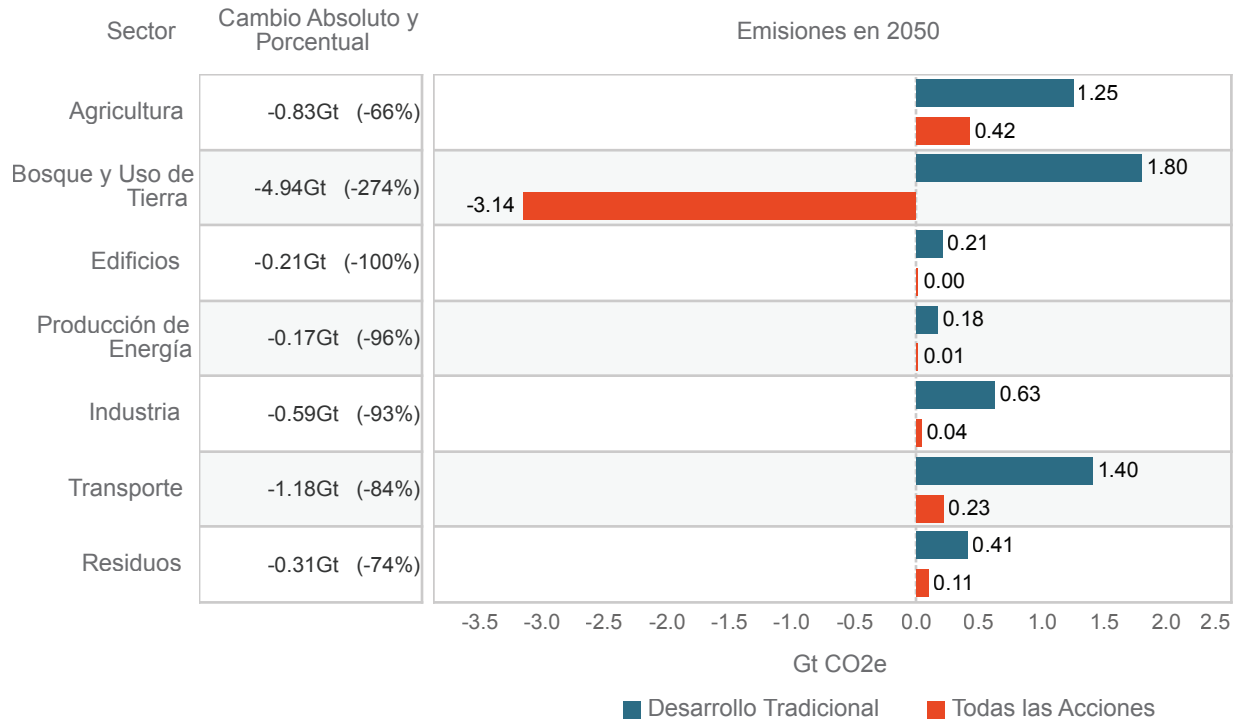


Figura 3.7 Emisiones por sector en 2050 bajo Desarrollo tradicional y Todas las acciones.

La figura 3.8 muestra los beneficios netos por sector bajo Todas las acciones, en relación con el Desarrollo tradicional. Aquí reasignamos los costos y beneficios de la producción de electricidad y energía a los sectores consumidores de energía para reflejar con mayor exactitud los costos y beneficios a los que se enfrentarán dichos sectores. Los mayores beneficios se registran en el transporte, donde la electrificación y la reducción de la demanda de transporte producen importantes ahorros en costos de combustible (775,000 millones de dólares), ahorros en el sistema de transporte (215,000 millones de dólares), beneficios en seguridad y congestión (200,000 millones de dólares) y beneficios en contaminación atmosférica evitada (150,000 millones de dólares). Los costos son, en comparación, modestos: 100,000 millones de dólares en inversiones técnicas, como la electrificación de los vehículos, y 70,000 millones de dólares en gastos de electricidad.

Los beneficios netos son grandes también en la agricultura, los bosques y el uso de la tierra: más de 900,000 millones de dólares, lo que incluye los beneficios de que la gente cambie a pautas más saludables de consumo de alimentos y los servicios ecosistémicos de los bosques. Otros sectores tienen beneficios más modestos pero aún así significativos: 150,000 millones de dólares en edificios, principalmente por el ahorro energético en electricidad, 215,000 millones de dólares en la industria, y 180,000 millones de dólares en residuos.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

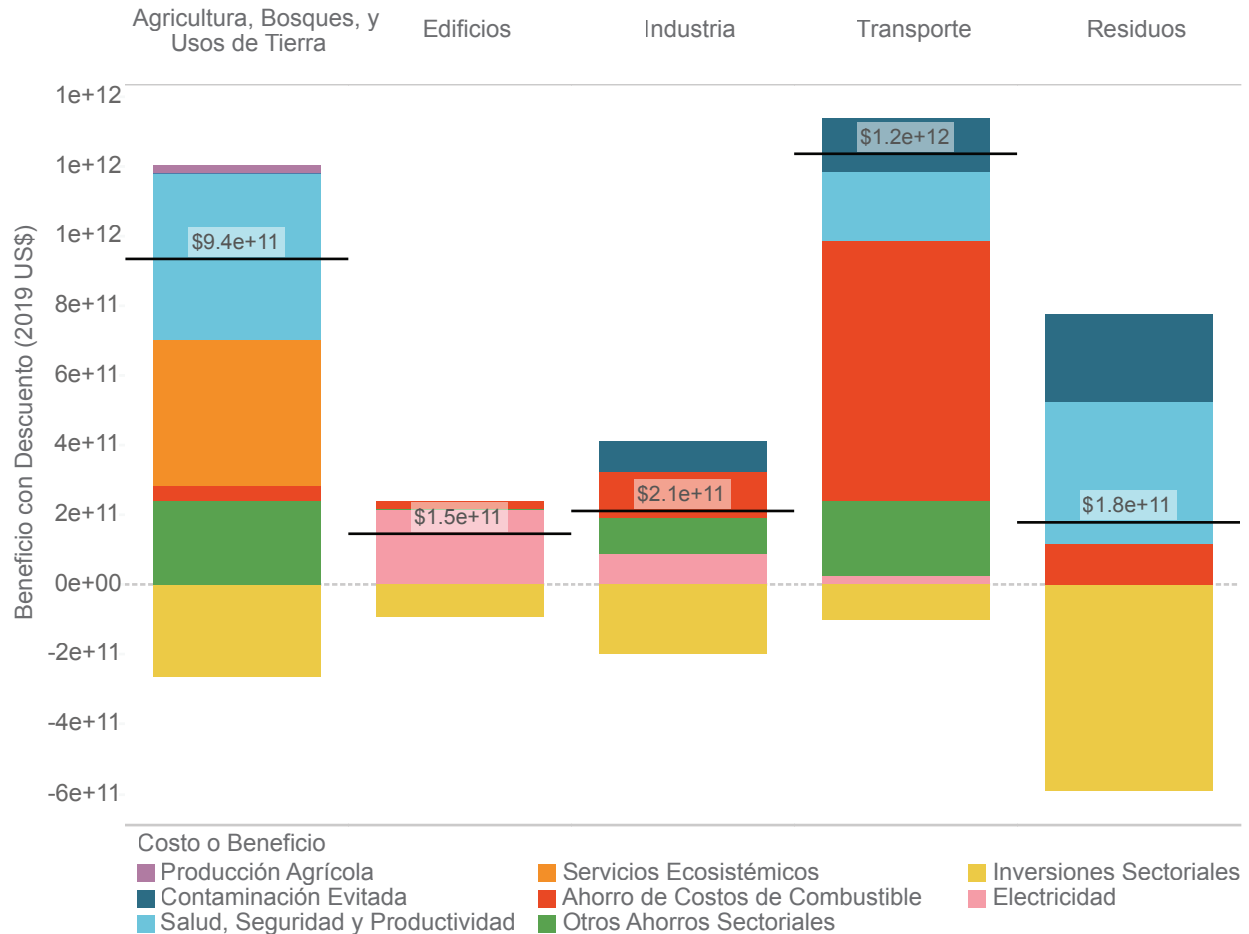


Figura 3.8 Beneficios netos por sector en Todas las acciones.

Es importante tener en cuenta que los costos y beneficios asociados a un sector concreto no significan que esos costos y beneficios vayan a recaer en los actores de ese sector. Por ejemplo, un cambio en los tipos de alimentos que consume la población tendrá consecuencias significativas para los agricultores, ganaderos y otros agentes del sector agrícola, pero los beneficios para la salud recaerán en el sistema sanitario y en los hogares. Otros beneficios como los servicios de los ecosistemas forestales son generalmente externos y se experimentan de forma difusa en toda la sociedad.

Análisis sectorial

En el resto de este capítulo, analizamos cómo transformar cada sector, identificamos a quién podría ser necesario movilizar para alcanzar los objetivos de descarbonización y desarrollo, y exploramos hasta qué punto los costos y beneficios de esas transformaciones podrían motivar u obstaculizar el cambio. Para ello, este capítulo utiliza los resultados a nivel sectorial para abordar las siguientes cuestiones:

- ¿Qué tipos de transformaciones impulsan los mayores cambios en las emisiones de cada sector y producen los mayores beneficios netos?
- ¿Qué transformaciones están en manos de los actores del sector y cuáles son impulsadas por los que están fuera del sector?
- ¿Cuáles son los beneficios netos de las transformaciones?
- ¿Cuáles son los costos y beneficios que corresponden a los actores de cada sector, cuáles son otros costos y beneficios internos experimentados por otros actores de la economía y qué costos y beneficios son en gran medida externos ?

Las respuestas son complejas, ya que las transformaciones realizadas en un sector tienen emisiones, costos y beneficios en otros sectores. Por ejemplo, las emisiones de la producción de hormigón se atribuyen a la industria, y los agentes industriales llevan a cabo en gran medida transformaciones, como la producción de hormigón mediante el cambio de combustible, el uso de CCS para capturar las emisiones del proceso y la sustitución del clínker. Sin embargo, los costos de estas transformaciones se trasladan en su mayor parte a los consumidores de hormigón en los sectores de la construcción y el transporte, que podrían entonces verse incentivados a utilizar el hormigón de forma más eficiente, lo que a su vez podría reducir el grado en que la industria necesita transformar su forma de producir hormigón.

Estas cuestiones son paralelas a las complejidades que existen desde hace tiempo en torno a la contabilidad del carbono del productor frente al consumidor a nivel nacional e internacional (Davis y Caldeira, 2010; Bastianoni et al., 2004; Jakob et al., 2021), y a la necesidad de que los gobiernos tomen la iniciativa a la hora de establecer los incentivos adecuados mediante inversiones públicas, diseño de mercados, creación de capacidades y señales de precios (Fazekas et al., 2022). En las siguientes secciones, tratamos las emisiones, los costos y los beneficios en el sector en el que se acumulan, excepto en el caso de la electricidad y los combustibles, que describimos en la sección "Producción de energía" y luego pasamos a cada sector que consume energía.

Producción de Energía

Según los supuestos nominales, la adopción de Todas las acciones reduce las emisiones procedentes de la producción de electricidad y combustibles de 1 GtCO₂e a 0,1 GtCO₂e en 2050. La reducción de las emisiones se consigue cambiando a la producción de electricidad e hidrógeno renovables y reduciendo las emisiones fugitivas, mientras que otros sectores aumentan simultáneamente su eficiencia energética y reducen su uso de combustibles fósiles. Esto arroja un beneficio neto de 500,000 millones de dólares, casi todo procedente del ahorro de costos de electricidad y combustible para la economía.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

El sector de la producción de energía incluye las emisiones procedentes de la generación de electricidad, la minería y extracción de combustibles, el procesamiento y refinado de combustibles y las emisiones fugitivas de estas actividades. La mayor parte de la energía se utiliza a nivel nacional en la región, pero algunos países son exportadores importantes (Solano-Rodríguez et al, 2019; Welsby et al., 2021). Como muestra la Figura 3.9, en el marco del desarrollo tradicional, las emisiones derivadas de la producción de energía en 2020 son de aproximadamente 0,6 GtCO₂e y aumentan hasta aproximadamente 1 GtCO₂e con el crecimiento de la población y del PIB. La mayoría de estas emisiones proceden de la producción de electricidad.

Las transformaciones en las mejoras incrementales incluyen mejoras de la eficiencia energética en toda la economía. En el sector de la producción de energía, la transformación clave es la reducción de las pérdidas técnicas en la transmisión de electricidad a los niveles de la OCDE, frente a los niveles mucho más altos de la región en la actualidad (Jiménez et al., 2014). En conjunto, estas transformaciones reducen las emisiones en un 50% en 2050, hasta 0,6 GtCO₂e, y reducen significativamente los costos de capital y operativos en el sector eléctrico y los costos de combustible (Figura 3.10).

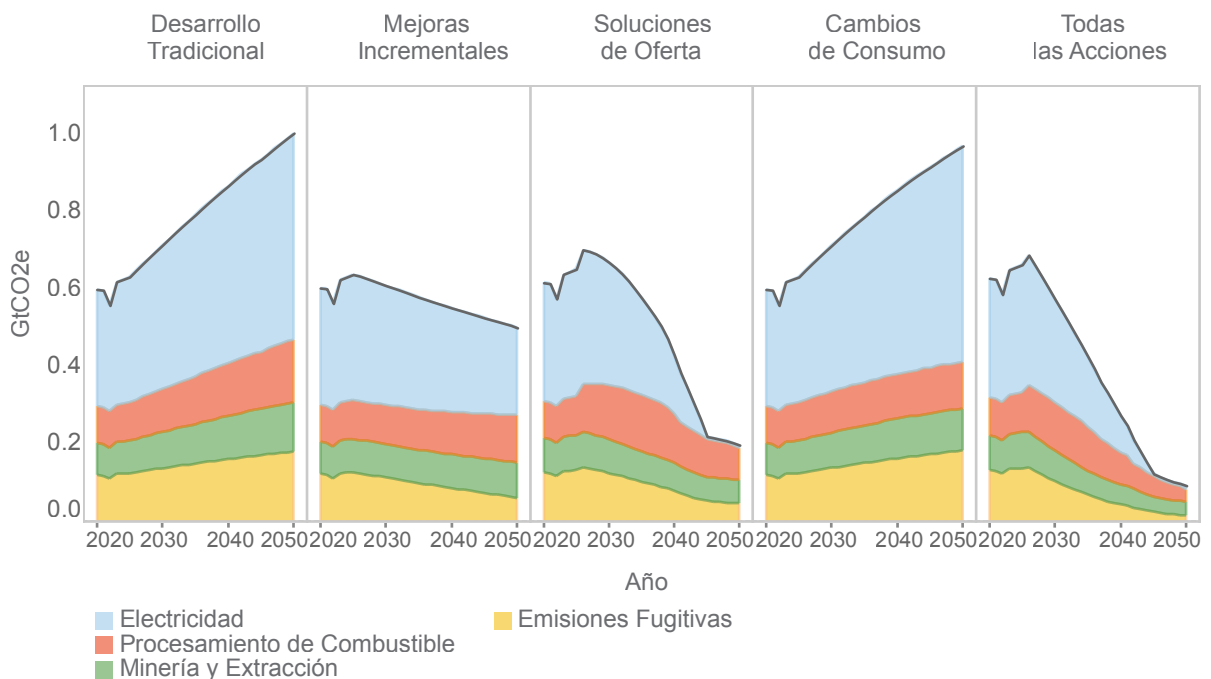


Figura 3.9 Emisiones de la producción de energía por categoría de transformación.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

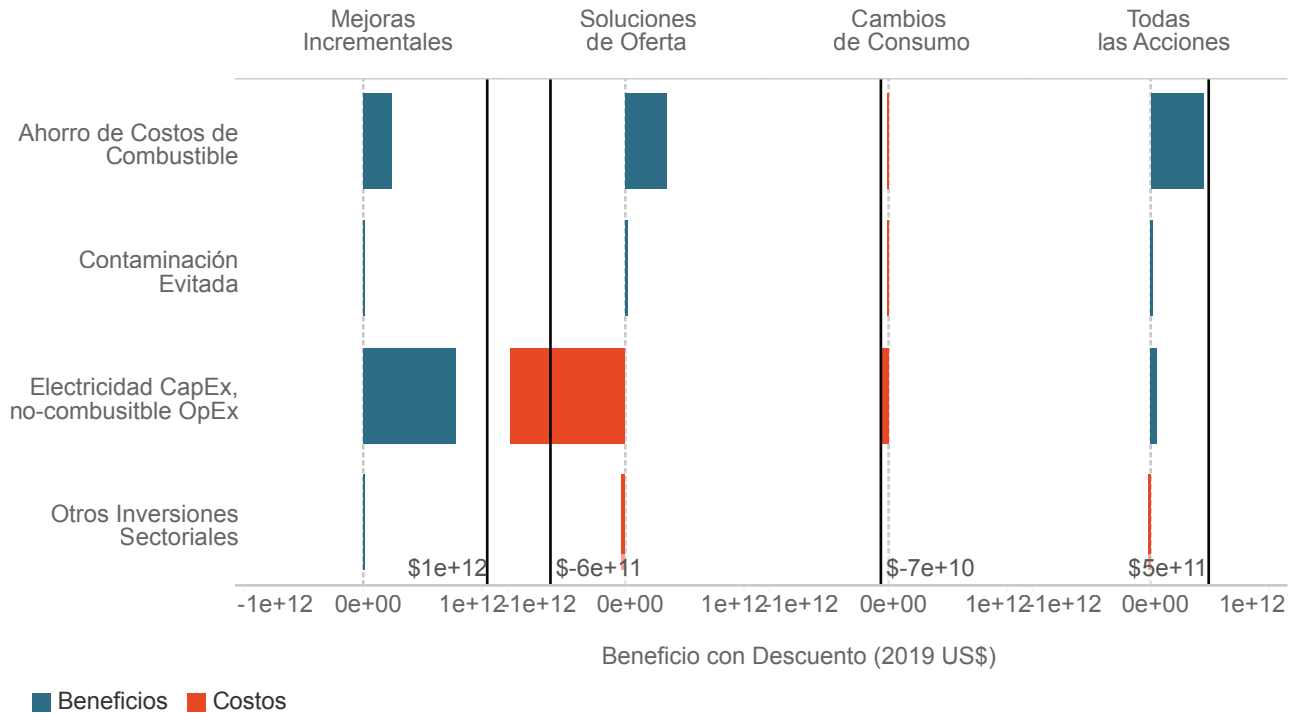


Figura 3.10 Costos y beneficios en la producción de energía por categoría de transformación.

Las transformaciones en el marco de las soluciones del lado de la oferta implican principalmente la transición de la producción de electricidad de los combustibles fósiles a las energías renovables (solar, eólica y geotérmica), como muestra la figura 3.9, al tiempo que se produce hidrógeno mediante electrólisis utilizando energías renovables. (Excluimos la expansión de las grandes centrales hidroeléctricas dadas las presiones climáticas a las que se enfrenta la región, así como las preocupaciones por la justicia medioambiental, la biodiversidad y otras cuestiones que dificultan la expansión hidroeléctrica en la práctica. Excluimos la expansión de las centrales nucleares por razones similares). Simultáneamente, otros sectores están pasando progresivamente de los combustibles fósiles a la electricidad y el hidrógeno, aumentando las demandas de producción. Estos cambios son costosos (figura 3.10), con un costo neto de 640,000 millones de dólares. Esto se debe a los grandes costos en capital eléctrico y gastos de explotación (capex y opex) necesarios para alcanzar el 95% de producción renovable en el mix eléctrico, que sólo se compensan en parte con el ahorro en costos de combustible. Otros costos y beneficios de inversión del sector son insignificantes en comparación. Es importante destacar que la descarbonización del sector eléctrico reduce las emisiones de otros sectores a medida que desplazan el uso de la energía hacia la electricidad (Audoly et al., 2018).

El cambio en el consumo tiene implicaciones modestas para el sector, derivadas de una mayor demanda de electricidad por la electrificación de los vehículos privados. Esta demanda añadida supone 65,000 millones de dólares en costos para el sector. (El ahorro en costos de combustible para el transporte derivado del cambio de combustible se analiza en la sección de transporte).

Todas las acciones reducen las emisiones de este sector a 0,1 GtCO₂e en 2050. Aunque las reducciones en relación con las soluciones del lado de la oferta son modestas, las implicaciones en términos de costos son significativas. Los esfuerzos realizados en toda la economía para reducir el consumo de energía implican que la transición a una red totalmente renovable y al hidrógeno verde no tienen costos netos de capital ni de funcionamiento no relacionados con el combustible en comparación con el Desarrollo tradicional, al tiempo que proporcionan un importante ahorro de combustible. Estos resultados son coherentes con los de investigaciones anteriores (McCollum et al., 2018). El beneficio neto es de 500,000 millones de dólares, casi en su totalidad en forma de ahorro de combustible en el sector. Como en otros sectores, el coste a menudo elevado del cambio de combustible puede compensarse de forma significativa con esfuerzos simultáneos y rentables de eficiencia energética.

Dado que este sector produce energía para el uso de otros sectores, los costos y beneficios se trasladarán a esos sectores consumidores. Por lo tanto, en el resto de las secciones sectoriales, distribuimos estos costos y beneficios entre los sectores que consumen energía, en función de su nivel de consumo.

Agricultura, bosques y otros usos de la tierra

Bajo supuestos nominales, la adopción de Todas las acciones reduce las emisiones de la agricultura, los bosques y el uso de la tierra en 2050 de un positivo neto de 3 GtCO₂e a un negativo neto de -2,6 GtCO₂e, principalmente por la combinación de detener la deforestación y, con el tiempo, cambiar los patrones agrícolas, lo que libera tierras para aumentar el cultivo de bosques secundarios. Esto supone un beneficio neto para las economías de la región de 940,000 millones de dólares, principalmente por los beneficios para la salud, el ahorro de los hogares y los servicios ecosistémicos de los bosques. Esto también incluye un coste para el sector agrícola de 200,000 millones de dólares por una combinación de costosas intervenciones técnicas como la mitigación de la fermentación entérica y las pérdidas de alimentos por el lado de la oferta.

La agricultura, los bosques y el uso de la tierra están entrelazados en América Latina y el Caribe, ya que la necesidad de pastos y tierras de cultivo impulsa una rápida deforestación (Armenteras et al., 2017; Zalles et al., 2021; Dumas et al., 2022). La demanda interna y las exportaciones de los productos agrícolas de la región han crecido a medida que aumentan la población y la riqueza, tanto en la región como en mercados de exportación clave como China (OCDE y FAO, 2022).

Este sector es una fuente importante de emisiones en la región. La figura 3.11 muestra las emisiones de este sector, que proceden de la producción de cultivos (incluidas las alteraciones del suelo y la aplicación de fertilizantes y otras enmiendas), de la ganadería (principalmente de la fermentación entérica y el estiércol) y de la conversión de tierras forestales en pastos o tierras de cultivo. Es importante tener en cuenta que la energía utilizada en la agricultura se incluye en la industria (por ejemplo, para el procesado de alimentos) y en el transporte (por ejemplo, para los vehículos).

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

Aunque la forestación es necesaria para secuestrar las emisiones residuales que no pueden reducirse en otros sectores, los bosques y los cambios en el uso de la tierra en conjunto son actualmente emisores netos, dado que la deforestación y la mortalidad de los árboles inducida por el clima superan el secuestro de los bosques restantes (Gatti et al., 2021).

Muchas transformaciones de este sector aumentan la productividad agrícola o disminuyen la demanda de productos agrícolas (principalmente carne), creando un desfase entre lo que se puede producir y los niveles previstos de demanda. Con el tiempo, este exceso en la capacidad de producción se utiliza para reducir la conversión de los bosques en tierras de cultivo o pastos, y para devolver a los bosques secundarios las tierras de cultivo y pastos que no se necesitan para la producción. Esto difiere de los patrones históricos de desarrollo en los que los aumentos de la productividad se han dirigido hacia el aumento de la producción agrícola para satisfacer la creciente demanda de productos agrícolas a nivel nacional e internacional, sin valorar plenamente los servicios ecosistémicos forestales primarios o secundarios. Este trabajo hace explícitas estas compensaciones, en consonancia con investigaciones anteriores (Searchinger et al., 2019).

La figura 3.12 muestra los servicios de los ecosistemas y otros costos y beneficios, comparados con un futuro bajo Desarrollo tradicional. Otros costos y beneficios son el valor de la producción agrícola; los beneficios para la salud, la seguridad y la productividad; la contaminación evitada; otros ahorros del sector en forma de reducción de mano de obra y otros insumos; y los costos de inversión del sector.

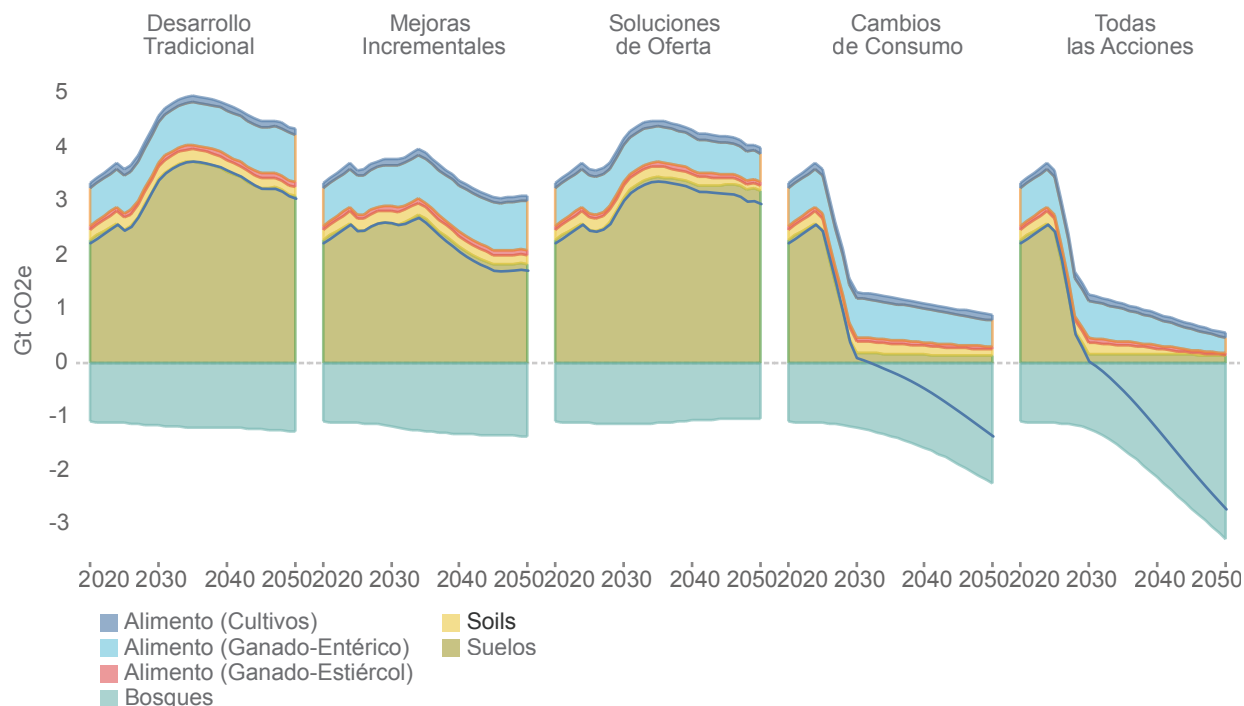


Figura 3.11 Emisiones producidas por la agricultura, los bosques y el uso de la tierra por categoría de transformación.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

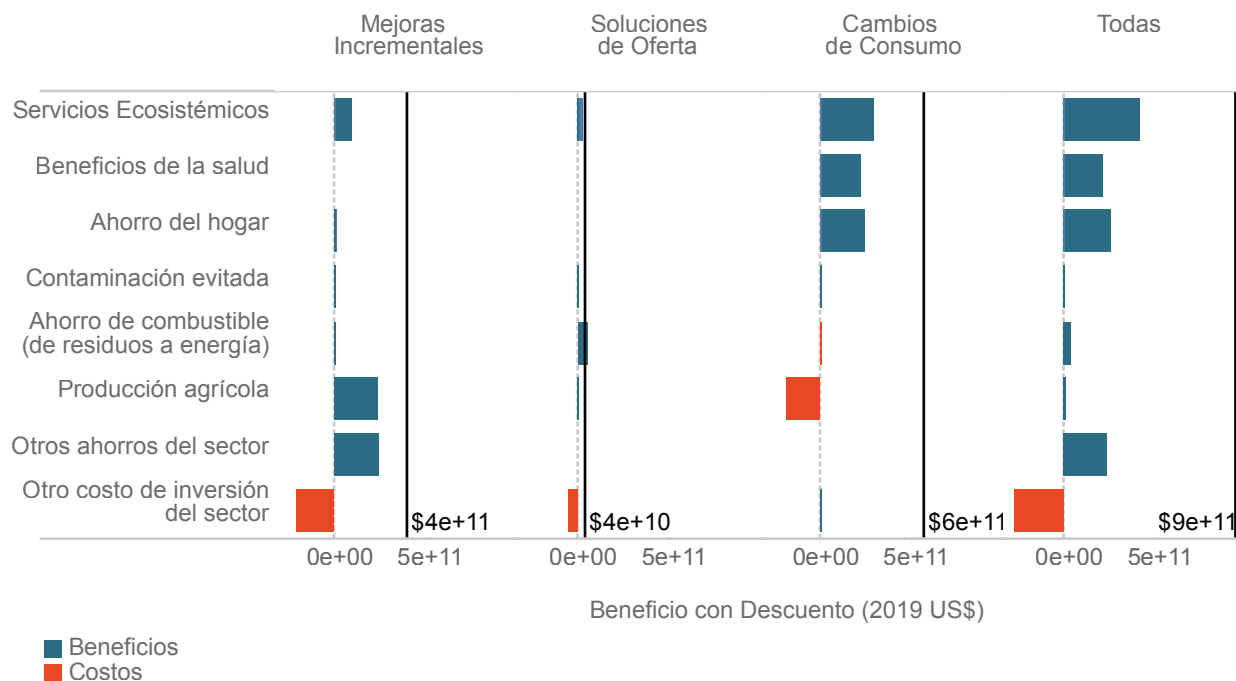


Figura 3.12 Costos y beneficios de las transformaciones de la agricultura, los bosques y el uso de la tierra por categoría de transformación.

En el marco de las mejoras incrementales, se acelera el aumento de la productividad agrícola y ganadera, se utilizan los fertilizantes de forma más eficaz, se practica la agricultura de conservación en zonas más extensas y se mejoran las prácticas de cultivo del arroz. Estos cambios ofrecen reducciones significativas de las emisiones a medida que se frena la deforestación, pero los efectos no son suficientes para mitigar las emisiones de la agricultura y la ganadería ni para convertir los bosques de emisores netos en secuestradores netos. Esta estrategia ofrece más de medio billón de dólares de ahorro en toda la economía, ya que la reducción de los residuos de la cadena de suministro y el aumento de la productividad conducen a una mayor producción agrícola que con el desarrollo tradicional, al tiempo que frenan la deforestación con el tiempo. La estrategia también ofrece otros ahorros, en términos de mano de obra evitada y otros insumos procedentes de la agricultura de conservación y el cultivo del arroz, así como valores más altos de las tierras que tienen una mejor salud del suelo. El resultado es que las Mejoras Incrementales reportan importantes beneficios netos sólo al sector (280,000 millones de dólares) y a la economía en general (400,000 millones de dólares).

Las soluciones del lado de la oferta implican varias transformaciones que cambian la forma en que se cría el ganado: reducir la fermentación entérica mediante intervenciones como la vacunación y el cambio de la dieta del ganado (EPA, 2019), utilizar mejores métodos de gestión del estiércol con recuperación y uso del biogás, y ampliar los sistemas silvopastoriles, que pueden aumentar la capacidad de carga de la tierra al tiempo que se reforestan los pastos. También implica intervenciones técnicas para reducir la pérdida de alimentos en la cadena de suministro agrícola, lo que reduce la cantidad de alimentos que es necesario cultivar.

Las soluciones del lado de la oferta mitigan las emisiones menos que las mejoras incrementales y tienen costos modestos tanto para la industria como para la economía en general. Las emisiones residuales importantes siguen siendo grandes porque el uso de la tierra no cambia en su mayor parte y las emisiones de la fermentación entérica son difíciles y caras de reducir: las intervenciones reducen las emisiones de metano en menos de un 25% de media (Arndt et al., 2022, Beauchemin et al., 2020), aunque algunas intervenciones específicas informan de una mayor eficacia (Vijn et al., 2020).

Cambiar el consumo implica detener finalmente la deforestación y cambiar los patrones de producción y consumo de alimentos, alejándolos de la carne y acercándolos a alternativas alimentarias más saludables, según Springmann et al. (2016). Esta transformación reduce a la mitad el consumo regional de carne y reduce el consumo de azúcar, al tiempo que aumenta la ingesta de frutas, verduras y proteínas vegetales. Investigaciones recientes sugieren que una gran parte de los beneficios dietéticos y medioambientales de la transformación de los alimentos podría conseguirse con pequeños ajustes, como sustituir la carne roja por pollo en los platos combinados, pero sin realizar ningún otro cambio en la dieta (Grummon et al., 2023). Estas transformaciones reducen drásticamente las emisiones al eliminar las emisiones derivadas de la conversión del uso de la tierra, un paso necesario para que los bosques de América Latina y el Caribe vuelvan a ser el sumidero neto de carbono necesario para compensar las emisiones residuales, en consonancia con las conclusiones de Dumas et al. (2022). Simultáneamente, la reducción de la producción y el consumo de carne de vacuno devuelve a los bosques secundarios las tierras de pastoreo y los cultivos utilizados como pienso, como la soja, lo que aumenta la capacidad de secuestro anual. Estos cambios tienen un efecto mayor en las emisiones de la región que cualquier otro de nuestro análisis.

Detener la deforestación y cambiar los patrones de producción y consumo de alimentos tiene enormes beneficios sociales y medioambientales. Dados los altos índices y costos de la obesidad en la región (Popkin y Reardon, 2018), un cambio hacia dietas más sanas, en comparación con una dieta de Desarrollo tradicional que aumente el consumo de carne roja per cápita para 2050, ofrece más de 200,000 millones de dólares sólo en beneficios de ahorro sanitario durante este periodo, incluso cuando los beneficios sanitarios per cápita se valoran modestamente. Gran parte de estos beneficios serán recuperados por el sector sanitario en costos sanitarios evitados. El ahorro en facturas de comestibles supone un beneficio aparte de aproximadamente 240,000 millones de dólares, dado el precio generalmente más alto de la carne en comparación con otras opciones alimentarias (Springmann et al., 2016; Springmann et al., 2017).

Los servicios de los ecosistemas son un beneficio importante, pero monetizar su valor es difícil y especialmente complicado en el caso de los servicios que son muy subjetivos y difíciles de valorar, como el valor de la biodiversidad o el valor espiritual y cultural de los bosques (Taye et al., 2021). Taye et al., por ejemplo, encuentran que el valor de los bosques tropicales húmedos encontrado en la literatura puede oscilar entre menos de 100 \$ por hectárea (ha) y bastante más de 10,000 \$/ha, y una mediana de todos los servicios proporcionados por los bosques tropicales es de aproximadamente 1,600 \$/ha. Encontramos que el valor total de los servicios de los ecosistemas es grande: un valor actual de 300,000 millones de dólares, incluso cuando utilizamos valores conservadores por hectárea de 500 \$/ha y 300 \$/ha para los bosques primarios y secundarios, respectivamente (Taye et al., 2021; Costanza et al., 2014).

Estos cambios suponen un coste para el sector agrícola, que renuncia a 185,000 millones de dólares en producción agrícola, principalmente en forma de producción de carne. Las investigaciones futuras deberán estudiar los medios para gestionar una transición rural en la región.

La adopción de Todas las acciones da lugar a un mayor secuestro a medida que el aumento de la productividad, el uso más generalizado de los sistemas silvopastoriles y el cambio en la producción de alimentos frenan conjuntamente la pérdida de bosque primario y aumentan los bosques secundarios. Cabe destacar que el valor económico añadido por el aumento de la producción agrícola derivado del incremento de la productividad es superior al valor económico perdido por el descenso de la demanda interna de carne. Estas transformaciones combinadas también tienen enormes beneficios sociales y medioambientales. El ahorro en salud pública y en los hogares derivado del cambio de dieta asciende en conjunto a medio billón de dólares, y los beneficios de los servicios ecosistémicos aumentan hasta los 415,000 millones de dólares. La industria, sin embargo, se enfrenta a un costo técnico de 265,000 millones de dólares. El resultado es un beneficio neto de aproximadamente 930,000 millones de dólares.

Edificios

Bajo supuestos nominales, la adopción de Todas las acciones reduce las emisiones de los edificios (incluida la producción de electricidad para su uso en edificios) en 2050 de 500 MtCO₂e a menos de 5 MtCO₂e. Esto elimina esencialmente las emisiones de los edificios mediante el aumento de la eficiencia energética y el cambio de combustible a electricidad, mientras que el sector eléctrico cambia simultáneamente a las energías renovables. Estas transformaciones tienen un beneficio neto de aproximadamente 150,000 millones de dólares -principalmente por el ahorro en costos de combustible y electricidad a lo largo del tiempo.

Como muestra la Figura 3.13, en el marco del Desarrollo tradicional, las emisiones industriales de América Latina y el Caribe aumentan con el crecimiento de la población y del PIB, pasando de aproximadamente 0,3 GtCO₂e en 2020 a 0,5 GtCO₂e en 2050. Esto incluye las emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles en los edificios y las emisiones asociadas al consumo de electricidad de los edificios. No incluye las emisiones incorporadas asociadas a los materiales de construcción, que se incluyen en la industria.

Las transformaciones en mejoras incrementales que reducen las emisiones incluyen el uso más eficiente de la energía dentro de los edificios y la mejora de las envolventes de los edificios para que requieran menos calefacción y refrigeración. Estas acciones reducen las emisiones de los edificios en más de la mitad (véase la figura 3.13). Además, como muestra la Figura 3.14, las mejoras incrementales en la eficiencia energética de los edificios tienen unos beneficios netos significativos de 700,000 millones de dólares: el coste de lograr la eficiencia energética puede compensarse totalmente con el ahorro directo de electricidad y de costos de combustible derivado de un menor consumo, y con el ahorro en la producción de energía del sector energético. No asignamos un valor monetario a los mejores niveles de confort, a la mejor calidad del aire interior gracias al abandono de la biomasa tradicional o los biocombustibles, o a los beneficios para la salud mental derivados de la reducción del ruido interior gracias a edificios mejor aislados.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

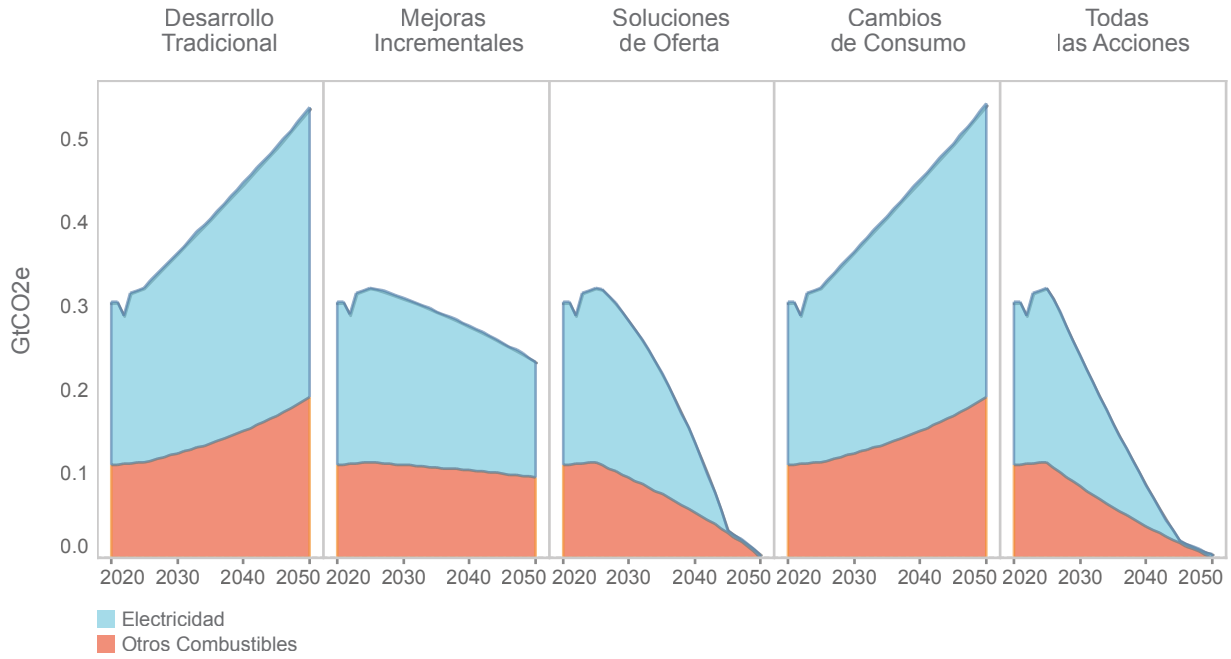


Figura 3.13 Emisiones producidas por los edificios por categoría de transformación.

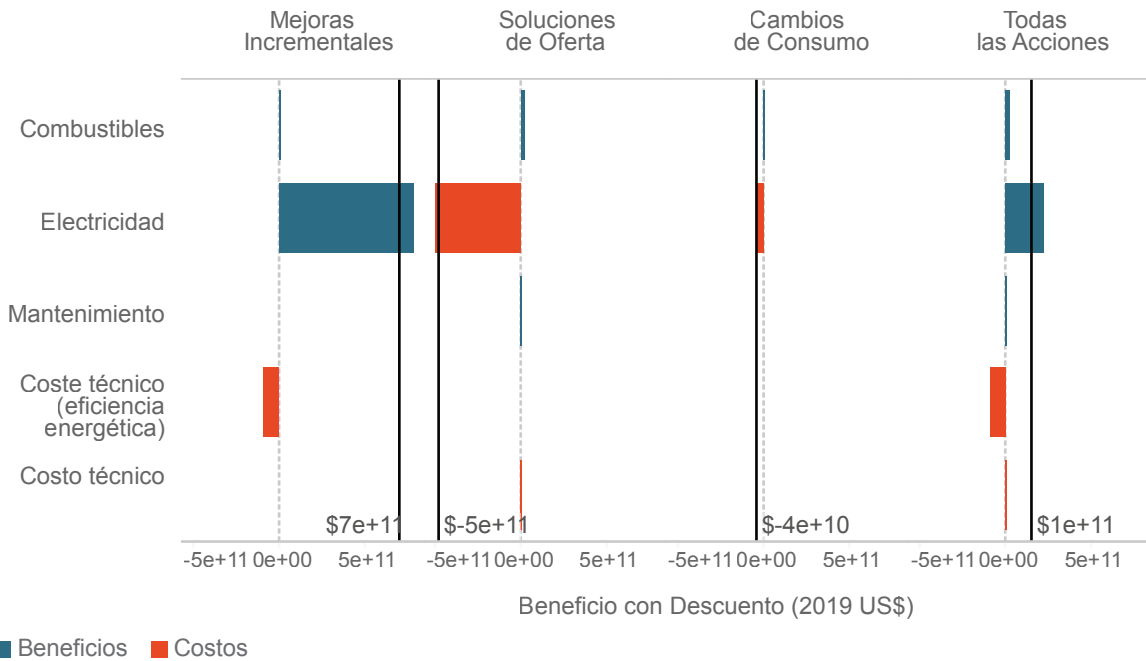


Figura 3.14 Costos y beneficios de las transformaciones de edificios por categoría de transformación.

Sin embargo, para reducir por completo las emisiones de los edificios es necesario adoptar algunas transformaciones incluidas en las Soluciones del lado de la oferta. Estas transformaciones incluyen el cambio de la energía térmica de los edificios de combustibles fósiles a electricidad, principalmente a través de bombas de calor (y no de calefacción por resistencia eléctrica), al tiempo que se cambia la producción de electricidad a energías renovables en el subsector de Producción de Energía (Audoly et al., 2018). Esto elimina esencialmente las emisiones de los edificios, pero los costos de un mayor consumo de electricidad y el aumento de los costos en la producción de esa electricidad resultan en un coste neto de aproximadamente 480,000 millones de dólares.

Todas las acciones combinan el aumento de la eficiencia energética con el cambio total a la electricidad, lo que da como resultado una reducción casi completa de las emisiones y unos beneficios netos de 150,000 millones de dólares. Este beneficio neto se produce porque el ahorro en electricidad derivado de las intervenciones de eficiencia supera la necesidad adicional de más electricidad resultante del cambio de combustible y se combina con el ahorro de paso en el sector energético.

Industria

Bajo supuestos nominales, la adopción de Todas las acciones reduce las emisiones industriales (incluidas las procedentes de la producción de electricidad para su uso en la industria) en 2050 de casi 400 MtCO₂e a 40MtCO₂e, una reducción del 90%, a partir de acciones que incluyen la eficiencia y la sustitución de materiales, la eficiencia energética y el cambio de combustibles, y la captura o destrucción de las emisiones restantes. Estas transformaciones ofrecen un beneficio neto de 213,000 millones de dólares procedentes del ahorro de combustible, electricidad y producción y de la contaminación evitada, que compensan los costos de 200,000 millones de dólares de eficiencia, CCS y otros cambios técnicos.

Como muestra la Figura 3.15, el sector industrial fue responsable de aproximadamente 0,4 GtCO₂e de emisiones en América Latina y el Caribe en 2020. Esto incluye las emisiones procedentes del consumo de energía; los procesos utilizados para fabricar productos industriales; y el uso de productos, como los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) en aerosoles y refrigerantes, que pueden tener un potencial de calentamiento de cientos a miles de veces superior al del CO₂. También incluye las emisiones procedentes de la producción de electricidad utilizada en la industria. Con un desarrollo tradicional, estas emisiones aumentan con el crecimiento de la población y del PIB hasta alcanzar 680 MtCO₂e en 2050.

Las emisiones producidas en el sector pueden reducirse mediante varias transformaciones. En el caso de las mejoras incrementales, las transformaciones incluyen el aumento de la eficiencia energética industrial y la sustitución de materiales vírgenes por materiales de desecho, sobre todo en la sustitución del clínker del cemento por subproductos industriales. La figura 3.16 muestra que las mejoras en la eficiencia energética y en el uso de productos pueden reportar unos beneficios netos de aproximadamente 160,000 millones de dólares: el costo de lograr la eficiencia puede verse compensado por el ahorro en costos de combustible, a lo que hay que añadir los beneficios de la contaminación atmosférica evitada. Casi todos estos beneficios recaerán en el sector industrial, que puede trasladar los beneficios a los sectores que utilizan productos industriales.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

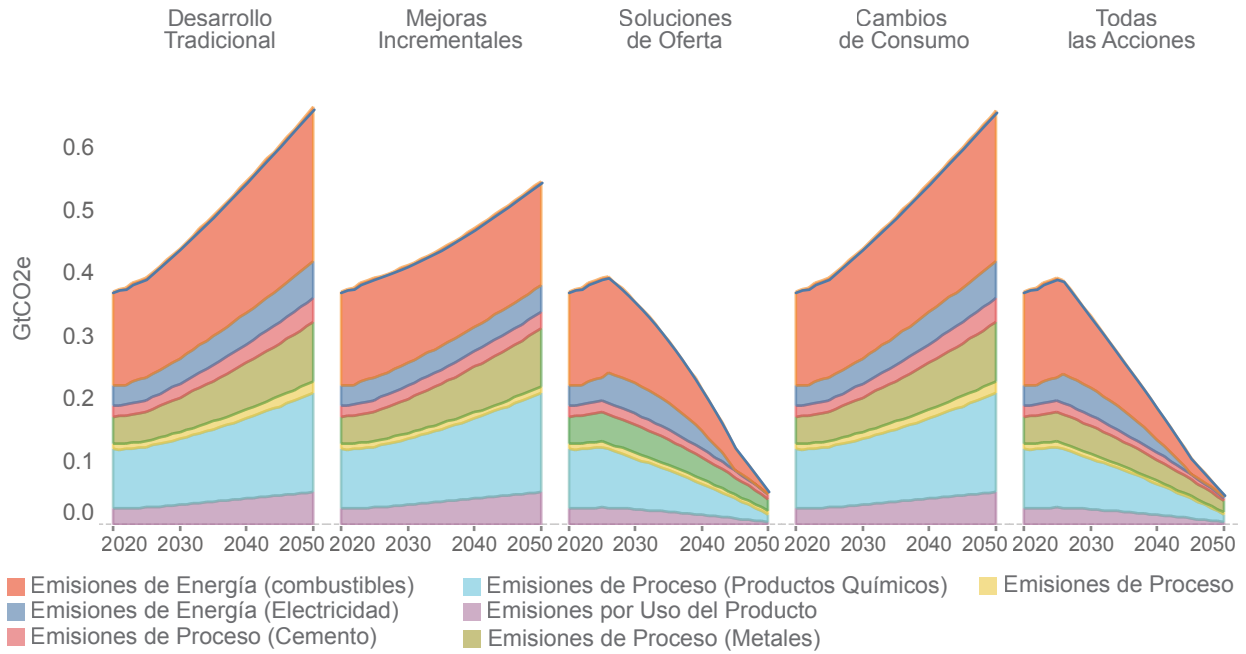


Figura 3.15 Emisiones producidas por la industria por categoría de transformación.

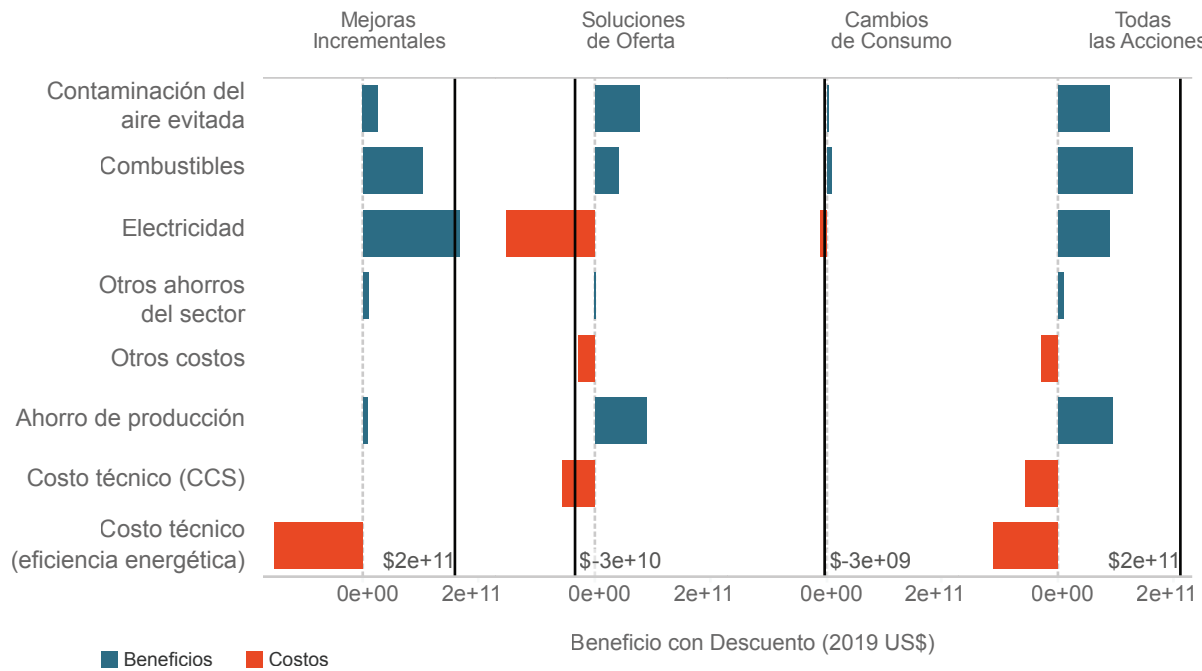


Figura 3.16 Costos y beneficios de las transformaciones industriales por categoría de transformación.

En las Soluciones del lado de la oferta, las transformaciones inducen cambios más significativos en la producción, incluido el cambio de combustible, de los combustibles fósiles a la electricidad y el hidrógeno; la captura y el uso de las emisiones de CO₂ de los procesos industriales clave y del uso de la energía (CCS); la destrucción o reducción de otro modo del N₂O y los gases fluorados; y el uso más eficiente de los productos industriales. Los cambios en las soluciones del lado de la oferta se realizan junto con un cambio en la producción de energía hacia la electricidad y el hidrógeno producidos con energías renovables.

Este paquete de transformaciones reduce las emisiones industriales en 2050 en casi un 90%. Estas transformaciones tienen un costo sustancial para el sector. El costo de producir electricidad e hidrógeno verde para satisfacer la demanda industrial supone un coste neto de 155,000 millones de dólares, que sólo se compensa en parte con un ahorro directo de combustible de 40,000 millones de dólares. La adopción de la captura y secuestro de carbono supone otro coste significativo de 60,000 millones de dólares. Un uso más eficiente de los materiales industriales, por otra parte, supone 90,000 millones de dólares en costos de producción evitados y 75,000 millones de dólares en contaminación atmosférica evitada.

La estrategia Todas las acciones también reduce las emisiones a 40 MtCO₂e, una reducción del 90% en comparación con el desarrollo tradicional. Reduce los costos técnicos de la transformación de la industria combinando el cambio de combustible y otros cambios de alto coste con transformaciones de eficiencia energética rentables que reducen el grado en que deben aplicarse esas transformaciones más caras. Esta transformación completa de la industria logra los objetivos de descarbonización con un coste menor para la economía. La mayoría de estas transformaciones implican cambios en la producción industrial, y sus costos y beneficios técnicos se experimentarán dentro del sector industrial. Una excepción clave es el uso eficiente de los materiales industriales. Esto dependerá en gran medida de la eficiencia con la que productos industriales como el cemento y el acero se utilicen en otros sectores -principalmente el transporte y la construcción- y los costos y beneficios directos de aumentar la eficiencia de los materiales recaerían en esos sectores.

Transporte

Bajo supuestos nominales, la adopción de Todas las acciones reduce las emisiones del transporte de 1,3 GtCO₂e a 0,2 GtCO₂e mediante el aumento de la eficiencia energética, la expansión del uso de la electricidad y el hidrógeno en todos los modos de superficie, y la ampliación del uso del tránsito para el transporte de pasajeros. Estas transformaciones producen un beneficio neto de más de 1,2 billones de dólares -el sector con mayores beneficios- al combinar el ahorro de costos de combustible (costos netos del hidrógeno), el ahorro de costos del sistema de transporte y los beneficios más amplios de la reducción de la contaminación atmosférica, la congestión y los accidentes que eclipsan los costos de inversión de 95,000 millones de dólares en eficiencia energética y cambio de combustible.

El transporte incluye el movimiento de pasajeros y mercancías por diversos modos. Entre ellos se incluyen el avión, el ferrocarril, los vehículos ligeros, medianos y pesados, el transporte marítimo, las motocicletas y los desplazamientos a pie y en bicicleta.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

La figura 3.17 muestra las emisiones del transporte por modos (los desplazamientos a pie y en bicicleta no tienen emisiones y se excluyen, y las emisiones de la electricidad se incluyen por separado ya que proceden del sector de producción de energía). Con el desarrollo tradicional, las emisiones se duplican, pasando de 0,64 GtCO₂e en 2020 a 1,3 GtCO₂e en 2050, impulsadas por el crecimiento del PIB y de la población y por un cambio modal de transporte hacia un mayor número de desplazamientos en vehículo personal asociado al aumento de la riqueza (Dargay y Gately, 2007).

En el marco de las mejoras incrementales, un aumento de la eficiencia energética reduce las emisiones en un 25% hasta 1 GtCO₂e, con unos beneficios netos de 270,000 millones de dólares (Figura 3.18) procedentes del ahorro de combustible y de los beneficios asociados a la contaminación atmosférica evitada. Sin embargo, estas reducciones quedan muy lejos de la disminución necesaria para alcanzar las cero emisiones netas.

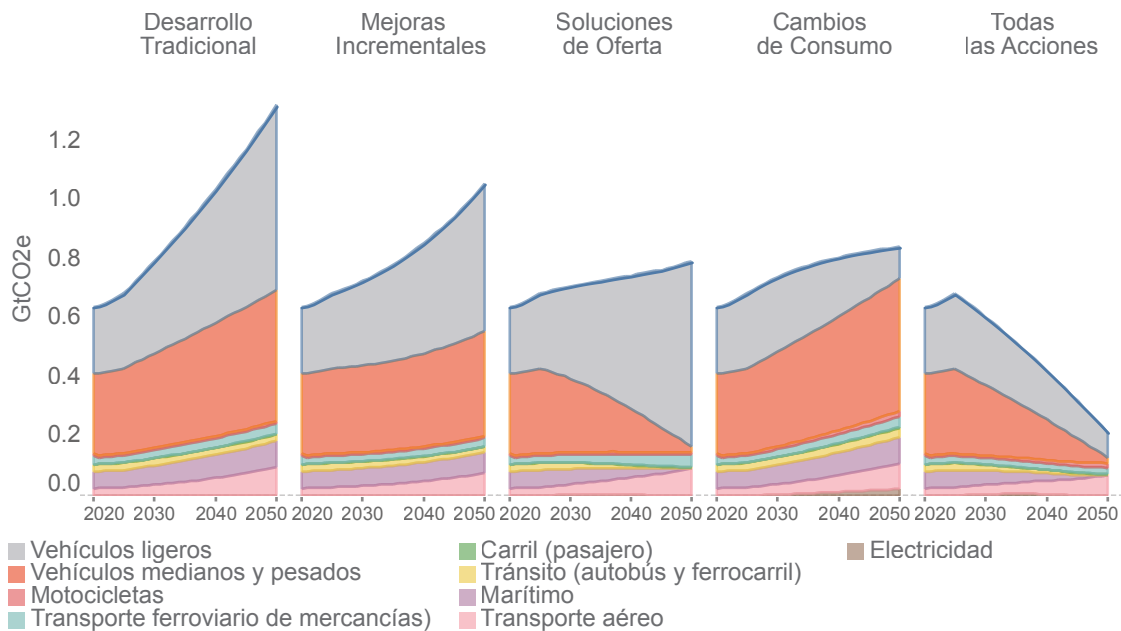


Figura 3.17 Emisiones por modo de transporte por categoría de transformación.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

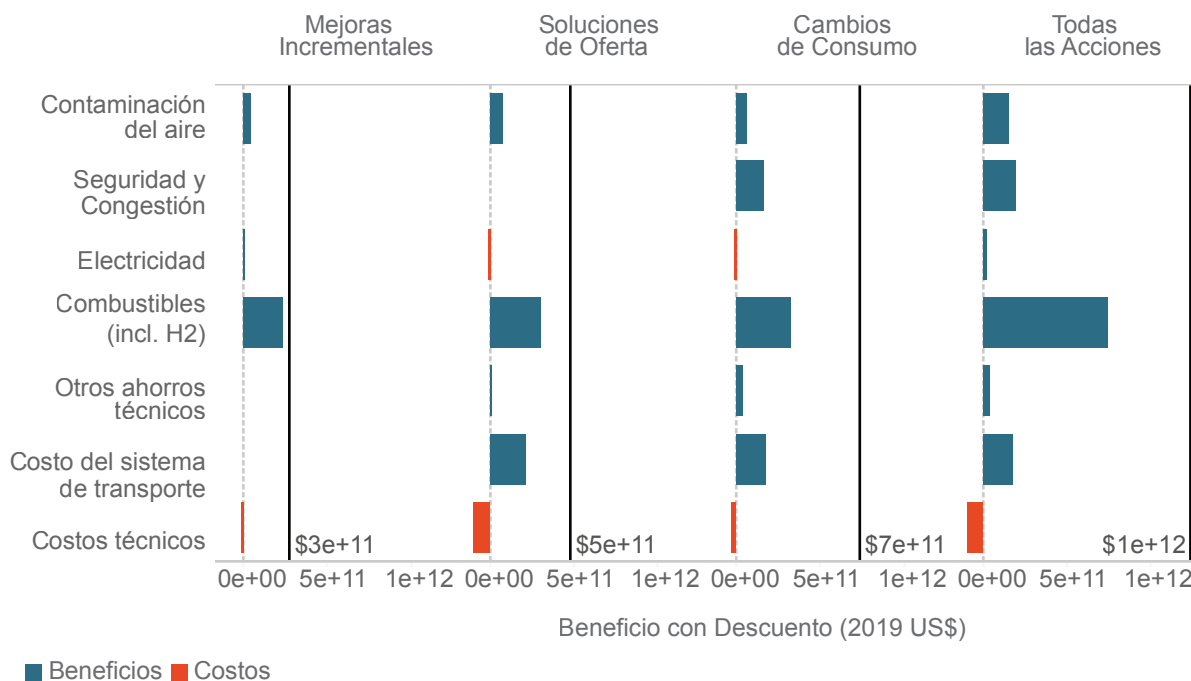


Figura 3.18 Costos y beneficios de la transformación del transporte por categoría de transformación.

En el marco de las soluciones del lado de la oferta, el transporte se transforma mediante el cambio de combustible, pasando del diesel y la gasolina a la electricidad y el hidrógeno en todos los modos de transporte de mercancías y en los modos públicos de pasajeros, como muestra la figura 3.17. Esto reduce las emisiones en un 40%. Estas transformaciones cuestan al sector 100,000 millones de dólares en costos de inversión, pero el ahorro de costos de combustible resultante, la contaminación atmosférica evitada y el ahorro de costos del sistema conducen a un beneficio neto de 480,000 millones de dólares. (Para más detalles, definimos los costos del sistema como el coste público y privado del transporte de personas y mercancías por diferentes modos, incluyendo los requisitos de infraestructura pero excluyendo el combustible para evitar una doble contabilización. Según la bibliografía y los datos descritos en los apéndices técnicos, el avión y el automóvil privado tienden a ser los más caros por pasajero o kilómetro de carga, mientras que el tránsito y el ferrocarril son mucho menos caros, por lo que el cambio modal ofrece un ahorro a nivel de todo el sistema. Esto, por supuesto, depende de qué tipos de tránsito se proporcionen y cómo. Exploramos estos supuestos y otros en nuestro análisis de incertidumbre).

Las transformaciones en el cambio de consumo se centran en los cambios en la actividad y el modo de transporte, e implican aumentar la ocupación de los vehículos privados; cambiar el modo de transporte local por el tránsito, los desplazamientos a pie y en bicicleta; cambiar el modo de transporte regional de pasajeros por el autobús y el ferrocarril; y electrificar los vehículos ligeros. Esta estrategia disminuye las emisiones en un 35% hasta 0,85 GtCO₂e e incurre en unos costos de 25,000 millones de dólares, derivados en su mayor parte de la electrificación de los vehículos ligeros.

Sin embargo, los beneficios más amplios, sobre todo derivados de la adopción del tránsito, dan como resultado un beneficio neto de 730,000 millones de dólares procedentes tanto de ahorros técnicos como los costos de combustible evitados, los costos de mantenimiento de los vehículos y los costos del sistema, como de beneficios más amplios de contaminación atmosférica evitada, colisiones y tiempo perdido en atascos y valorados en función de la productividad. El sector sanitario y los empresarios tienen mucho que ganar con las transformaciones del transporte que aumentan la productividad social y la salud.

La adopción de Todas las acciones supone una reducción de las emisiones del transporte del 85%, hasta 0,2 GtCO₂e. Las emisiones residuales significativas y potencialmente difíciles de reducir en este sector pueden requerir compensaciones en otros lugares. Estos cambios producen en conjunto los mayores beneficios de cualquier sector de más de 1,2 billones de dólares, a partir de una combinación de ahorro de combustible, costos del sistema de transporte y contaminación atmosférica evitada, congestión y costos de colisión que superan con creces los costos de inversión del cambio de combustible, la eficiencia energética y otras inversiones técnicas. Sin embargo, estas transformaciones impondrán costos muy diferentes a los distintos actores. En particular, el paso al tránsito puede suponer costos significativos para las autoridades del transporte público, incluso aunque reduzca los costos para el consumidor de la propiedad de vehículos privados y los costos de funcionamiento.

Residuos

Bajo supuestos nominales, la adopción de Todas las acciones reduce las emisiones procedentes de los residuos de 0,4 GtCO₂e a 0,1 GtCO₂e al conseguir un saneamiento seguro universal, el tratamiento de las aguas residuales y la gestión de los residuos sólidos; al reducir los residuos alimentarios de los consumidores; y al capturar el biogás de las instalaciones de residuos. Estas transformaciones producen un beneficio neto de 180,000 millones de dólares. La gestión universal de los residuos y el tratamiento del agua son costosos, pero no sólo son acciones esenciales para el desarrollo básico, sino que producen importantes beneficios netos en términos de salud y de contaminación evitada.

El sector de los residuos abarca la gestión de residuos líquidos y sólidos, incluidos el saneamiento y el alcantarillado, el tratamiento de aguas residuales, la recolección de residuos sólidos y la gestión de residuos sólidos mediante el vertido, el reciclaje, el compostaje y otros flujos de gestión de residuos. Como muestra la Figura 3.19, en el marco del desarrollo tradicional, las emisiones de este sector crecen de 0,23 GtCO₂e en 2020 a 0,41 GtCO₂e con el crecimiento demográfico y económico.

Las Mejoras Incrementales logran el saneamiento seguro universal para 2030, en consonancia con los ODS del Programa de Desarrollo de la ONU (OMS, 2021), así como el tratamiento de todas las aguas residuales y el fin de los flujos de residuos sólidos no gestionados. También amplía el reciclaje. Estos cambios reducen las emisiones en un 20% (figura 3.19) pero son caros (figura 3.20), ya que cuestan 385,000 millones de dólares en infraestructuras y operaciones cívicas. Los beneficios para la salud asociados a un saneamiento seguro (Hutton & Varughese, 2016) y la contaminación evitada asociada a los vertidos a cielo abierto (Wilson et al., 2015) compensan los costos. El resultado es un beneficio neto de 160,000 millones de dólares.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

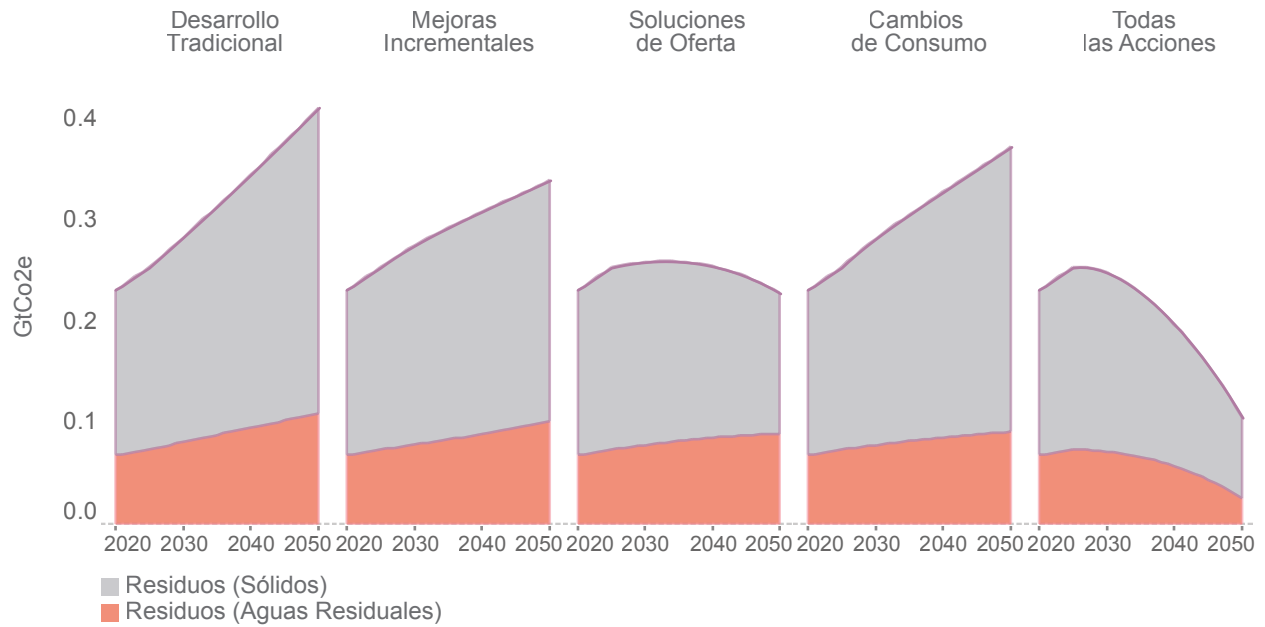


Figura 3.19 Emisiones producidas por los residuos por categoría de transformación.

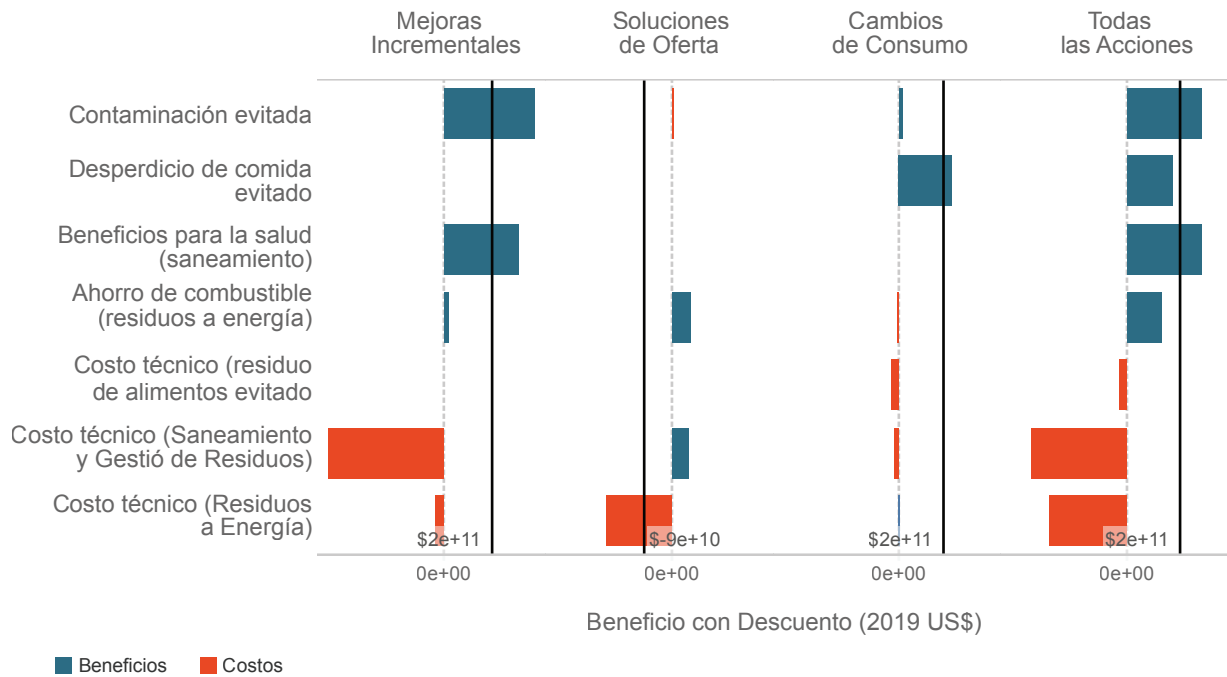


Figura 3.20 Costos y beneficios de la transformación del sector de los residuos por categoría de transformación.

CAPÍTULO 3

Comprender los efectos de las transformaciones en la descarbonización y el desarrollo

Las Soluciones del Lado de la Oferta implican una mayor recuperación de energía de las instalaciones preexistentes de tratamiento de aguas residuales y gestión de residuos, reduciendo las emisiones del sector a 0,22 GtCO₂e para 2050. Esta estrategia no amplía los sistemas de saneamiento, gestión de residuos o tratamiento de aguas, ya que éstos se incluyen en las Mejoras Incrementales. La valorización energética de residuos por sí sola supone un coste neto de 90,000 millones de dólares, ya que el coste de la valorización de residuos puede no verse compensado por el valor económico de la energía recuperada (AIE, 2020).

Cambiar el consumo implica cambios en el comportamiento de los consumidores que reducen el desperdicio de alimentos y desvían los residuos de alimentos orgánicos a compostadores y digestores. Por sí solas, estas transformaciones reducen las emisiones en torno a un 10%, hasta 0,37 GtCO₂e. Mientras que los efectos sobre las emisiones son modestos, los beneficios para los consumidores son significativos, ahorrando a 150,000 millones de dólares en costos evitados de residuos alimentarios. Los beneficios también incluyen los costos de gestión de residuos evitados.

Todas las acciones combinan estas transformaciones para reducir las emisiones en un 75% hasta 0,1 GtCO₂e. En combinación, estas acciones tienen unos beneficios netos de 180,000 millones de dólares -con 600,000 millones de dólares en costos técnicos compensados por 780,000 millones de dólares en ahorros en salud y contaminación y en costos evitados de combustible y producción de alimentos. Y lo que es más importante, muchas de estas transformaciones son una parte esencial del desarrollo.

Costos y beneficios de lograr
la carbono-neutralidad en
América Latina y el Caribe

4

CAPÍTULO

**Una estrategia robusta para alcanzar la
carbono-neutralidad en América Latina
y el Caribe**

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

Las estrategias de descarbonización de los países, incluidas sus NDC y LTS, implicarán transformaciones en toda la economía. Que alcancen o no la carbono neutralidad, y a qué costos y beneficios, dependerá de muchos factores profundamente inciertos relacionados con los motores sociales y económicos subyacentes, los efectos de las transformaciones sobre las emisiones y los costos y beneficios de las distintas acciones.

En este capítulo, esperamos ayudar a los países de América Latina y el Caribe a trazar una estrategia robusta hacia la descarbonización que alcance las cero emisiones netas y proporcione beneficios económicos netos, a pesar de estas incertidumbres. Para ello, primero identificamos los elementos clave de la región para las estrategias de descarbonización, preguntándonos qué transformaciones son críticas para alcanzar la carbono-neutralidad.

A continuación nos planteamos preguntas para formular una estrategia que cumpla con solidez los objetivos de cero emisiones netas ante una profunda incertidumbre.

- ¿Las estrategias organizadas en torno a transformaciones críticas alcanzan las cero emisiones netas en condiciones de incertidumbre?
- ¿Qué condiciones exógenas amenazan más los objetivos de balance cero?
- ¿Cuál es una estrategia sólida para alcanzar las cero emisiones netas en la región?

Con una estrategia de este tipo, podemos evaluar los costos y beneficios de la descarbonización de América Latina y el Caribe, entendiendo lo siguiente:

- ¿Cuál es el abanico de costos y beneficios de alcanzar el cero neto con esta estrategia?
- ¿Qué condiciones pueden hacer que la descarbonización suponga costos netos?
- ¿A quién corresponden los costos y los beneficios?

Ingredientes clave de las estrategias de descarbonización para la región

Como se describe en el capítulo 2, desarrollamos 1,000 estrategias de descarbonización que implementan todas las transformaciones simultáneamente pero en diferentes grados, que van desde la no implementación (0%) hasta la implementación máxima (100%). (La implementación máxima difiere para cada transformación y se define en los apéndices técnicos). De estas simulaciones, omitimos 17 que no se completaron con éxito. La figura 4.1 muestra las emisiones de las 983 restantes como trayectorias azules, junto a las cinco trayectorias analizadas en el capítulo 3.

Los resultados muestran que hacer un poco de todo puede reducir las emisiones al menos tan bien como hacer unas pocas transformaciones clave en las Mejoras Incrementales o las Soluciones del Lado de la Oferta con el máximo efecto. Sin embargo, menos del 1% de estas estrategias alcanzan el cero neto en 2050. Está claro que algunas transformaciones son más importantes que otras.

CAPÍTULO 4

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

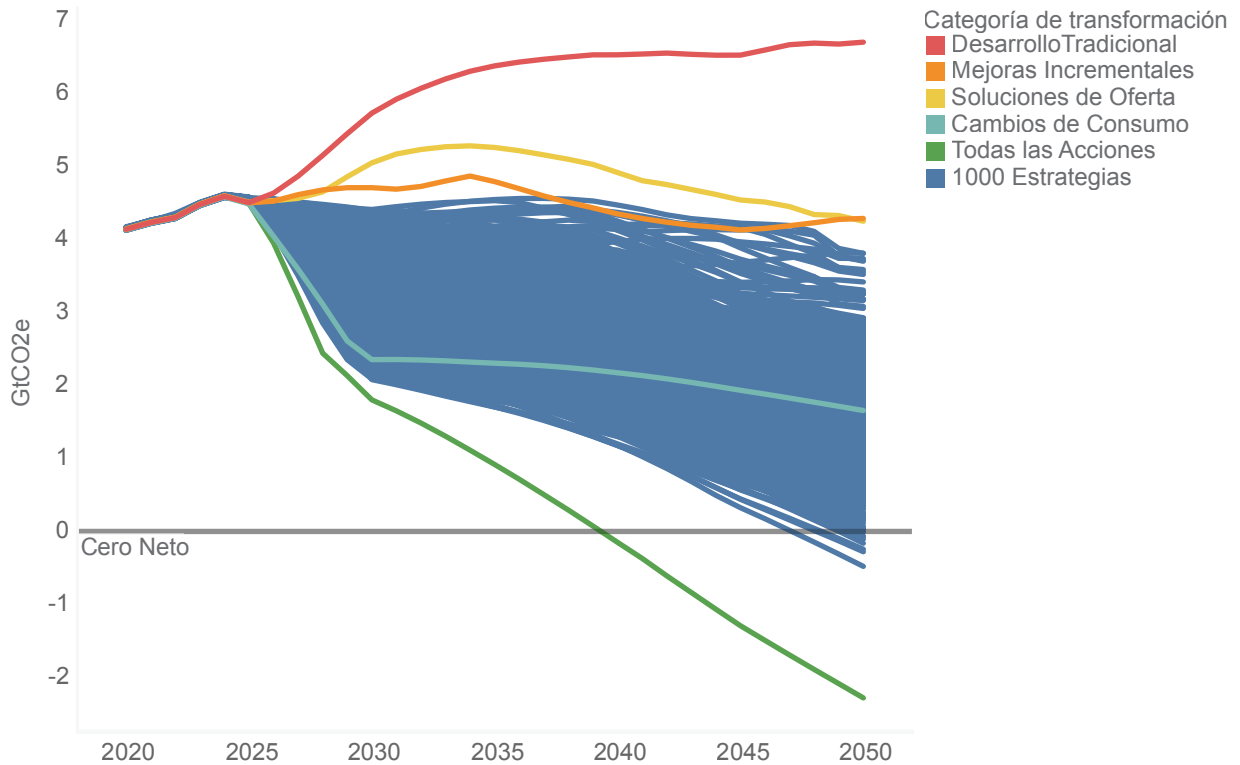


Figura 4.1 Trayectorias de emisiones de 1,000 estrategias de descarbonización.

Los análisis estadísticos revelan que, de las más de 50 transformaciones individuales, cuatro son los principales impulsores de la descarbonización: acabar con la deforestación, cambiar los patrones de producción y consumo de alimentos, producir electricidad e hidrógeno con renovables y electrificar el transporte. La tabla 4.1 detalla estas transformaciones y sus niveles de aplicación, con más detalles en los apéndices.

Tabla 4.1 Transformaciones críticas y explicación de los niveles de aplicación

| Transformación crítica | Descripción | Explicación de los niveles de aplicación |
|---|--|--|
| Acabar con la deforestación | La tasa media anual de deforestación de la región es de aproximadamente 2,6 millones de hectáreas (ha) al año (CEPAL, 2021). Esta transformación establece un límite al número de hectáreas que pueden deforestarse cada año. Este límite se aplicará progresivamente a lo largo de cinco años, entre 2025 y 2030. | Con un nivel de aplicación máximo, la deforestación a partir de 2030 se limita a menos de 10.000 ha/año, lo que supone el fin efectivo de la deforestación. Un nivel de aplicación del 70%, por ejemplo, fija el tope en 780.000 ha/año (el 30% de 2,6 millones). |
| Cambio de las pautas de producción y consumo de alimentos | Esta transformación reduce la producción de carne de vacuno en la región y ajusta en consecuencia las dietas regionales, aumentando la ingesta de frutas, verduras, legumbres y otras opciones más saludables. Estos cambios dejan espacio para la forestación y reducen las emisiones procedentes de la fermentación entérica y el estiércol. | Con una implementación máxima, la producción de carne se reduce en 2050 en un 50% de la demanda doméstica de carne, en comparación con el consumo bajo el Desarrollo tradicional, con los correspondientes aumentos en la ingesta de otras frutas, verduras y legumbres. Una implementación del 70%, por ejemplo, corresponde a reducir la producción en un 35% de la demanda doméstica en 2050. |
| Producir energía renovable | Esta transformación aumenta la fracción de electricidad (e hidrógeno) producida con energía solar, eólica y geotérmica, utilizando almacenamiento según sea necesario. Dados los factores de estrés climático y las barreras sociopolíticas, esta transformación no incluye el aumento de la energía hidroeléctrica o nuclear. No se incluye la CCS para centrales eléctricas, dado el coste mucho más elevado en comparación con las renovables y la inmadurez tecnológica. | Con una implantación máxima, en 2050 el 95% de la electricidad y el 100% del hidrógeno se producen con renovables, a medida que se van eliminando las centrales de carbón, gas y otros combustibles fósiles. Con una implantación del 70%, por ejemplo, el 66% de la electricidad y el 70% del hidrógeno se producen con renovables. |
| Cambio de combustible en el transporte | Esta transformación desplaza todo el transporte hacia la electricidad y el hidrógeno. | Con una implantación máxima, en 2050, el 70% del transporte en vehículos ligeros es eléctrico; el 70% del transporte pesado y marítimo es eléctrico; el 30% restante funciona con hidrógeno; y el 25% del ferrocarril está electrificado. Con una implantación del 70%, por ejemplo, esas cifras pasan del 70% al 49%; del 30% al 21%; y del 25% al 17,5%. |

CAPÍTULO 4

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

Las figuras 4.2 y 4.3 ilustran esta conclusión. La figura 4.2 muestra las emisiones netas en 2050 (eje vertical) frente a un nivel medio simple de aplicación en estas cuatro transformaciones críticas (eje horizontal). Cada punto representa una de las 1,000 estrategias simuladas. El nivel medio de aplicación de estas cuatro transformaciones explica el 75% de la trayectoria de las emisiones de una estrategia; las docenas de otras transformaciones sólo explican alrededor del 25% del resultado de las emisiones. Además, las pocas estrategias que alcanzan la carbono-neutralidad implementan todas las transformaciones críticas al menos al 70% de su nivel máximo.

La figura 4.3 muestra la importancia de estas transformaciones críticas clasificando las estrategias que tienen una implementación "alta" o "baja" de cada una de las cuatro transformaciones críticas, donde "alta" corresponde a una implementación de al menos el 50%. Muestra que el 90% de las estrategias que tienen una implementación alta de las cuatro transformaciones críticas alcanzan la carbono-neutralidad (recuadro inferior derecho). El porcentaje que alcanza la carbono-neutralidad cae precipitadamente al 40% si incluso una de las cuatro transformaciones críticas se implementa a un nivel bajo. (Aquí, el 40% es el número medio de estrategias que alcanzan el cero neto en las 4 casillas con sólo tres transformaciones críticas implementadas en alto grado, mostradas en los bordes inferior y derecho con porcentajes individuales del 52%, 56%, 17% y 38%).

Para ser claros, la aplicación elevada de estas cuatro transformaciones es necesaria para alcanzar la carbono-neutralidad, pero insuficiente por sí sola. Las transformaciones deben producirse en toda la economía y en todos los sectores, desde el uso eficiente de los materiales y la energía hasta la adopción de la CCS en determinadas industrias o el cambio al transporte público y no motorizado. Sin embargo, el grado de aplicación de otras transformaciones para alcanzar el cero neto puede variar y estar hecho a medida: un uso más eficiente del acero y el cemento, por ejemplo, puede permitir tasas de CCS más bajas en la producción de acero y cemento. Estas compensaciones pueden regirse por consideraciones de costo, financiamiento, equidad, infraestructura, viabilidad tecnológica y otros factores.

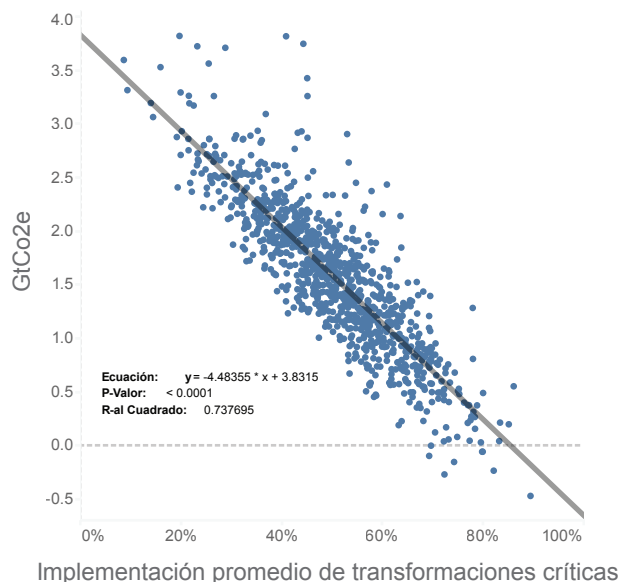


Figura 4.2. Emisiones en 2050 frente a la aplicación de cuatro transformaciones críticas.

CAPÍTULO 4

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

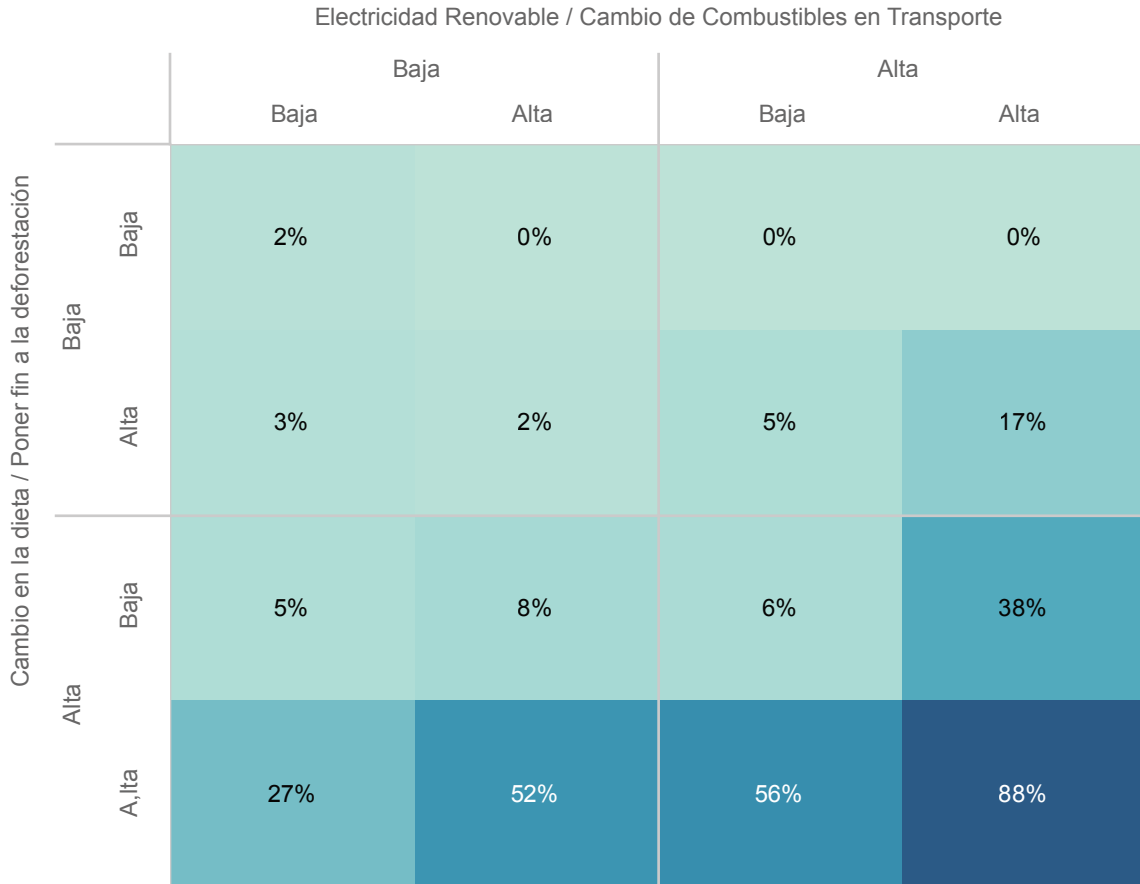


Figura 4.3 Porcentaje de estrategias que alcanzan el cero neto mediante la intensidad de las transformaciones críticas.

Cumplir con solidez los objetivos de carbono-neutralidad en medio de una gran incertidumbre

Una vez identificadas las cuatro transformaciones críticas, nuestros siguientes pasos ayudan a formular una estrategia que alcance los objetivos de carbono-neutralidad en medio de una gran incertidumbre. Examinamos el modo en que los distintos niveles de aplicación de las transformaciones críticas y otras transformaciones alcanzan o no alcanzan el objetivo en medio de la incertidumbre, qué incertidumbres exógenas explican mejor un fracaso en alcanzar la carbono-neutralidad y qué aspecto podría tener una estrategia robusta para la región.

¿Las transformaciones críticas alcanzan con solidez las cero emisiones netas en condiciones de incertidumbre?

Utilizamos la etiqueta "Acciones Críticas" para describir una estrategia que tiene una alta implementación de las cuatro transformaciones críticas previamente identificadas, y alguna implementación de todas las demás transformaciones. Aquí, examinamos cómo se comportan las Acciones Críticas en términos de emisiones, costos y beneficios, cuando introducimos las numerosas y profundas incertidumbres que desafían la planificación de la descarbonización. Como se describe en el capítulo 2, generamos 1,000 variantes de Acciones Críticas, en las que las cuatro transformaciones críticas se implementan del 50% al 100%, y todas las demás transformaciones se implementan entre el 25% y el 100%. Evaluamos las Acciones Críticas frente al Desarrollo tradicional en 1,000 futuros diferentes que representan la incertidumbre en torno a los factores que afectan a las emisiones, los costos y los beneficios (Tabla 2.4). De ellas, omitimos 16 simulaciones que no se completaron con éxito.

La figura 4.4 muestra las trayectorias de emisiones de las 984 variantes de Acción Crítica restantes y del Desarrollo tradicional en diferentes condiciones futuras. Los resultados muestran que la gama de emisiones bajo el Desarrollo tradicional es bastante amplia, oscilando entre un futuro en el que las emisiones se estabilizan frente a un aumento de muchas veces, dependiendo de los supuestos sobre el crecimiento futuro, las elasticidades de la demanda y otros factores impulsores de las emisiones. Sin embargo, las Acciones Críticas conducen sistemáticamente las emisiones cerca de la carbono-neutralidad, con emisiones en 2050 que oscilan entre 2 y -2 GtCO₂e, dependiendo del futuro.

Clasificamos las variantes de Acciones Críticas en tres grupos que se distinguen por lo cerca que están de alcanzar las emisiones netas cero en 2050. El 45% de las variantes de Acciones Críticas alcanzan el cero neto aproximadamente en 2050 (en azul; las emisiones en 2050 oscilan entre 0,5 y-- 0,5 GtCO₂e). Otro 13% alcanza el cero neto antes de 2050. Estos "excesos" tienen unas emisiones en 2050 inferiores a -0,5 GtCO₂e. Por último, el 42% de las variantes de acción crítica no alcanzan la carbono-neutralidad, con emisiones en 2050 superiores a 0,5 GtCO₂e.

CAPÍTULO 4

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

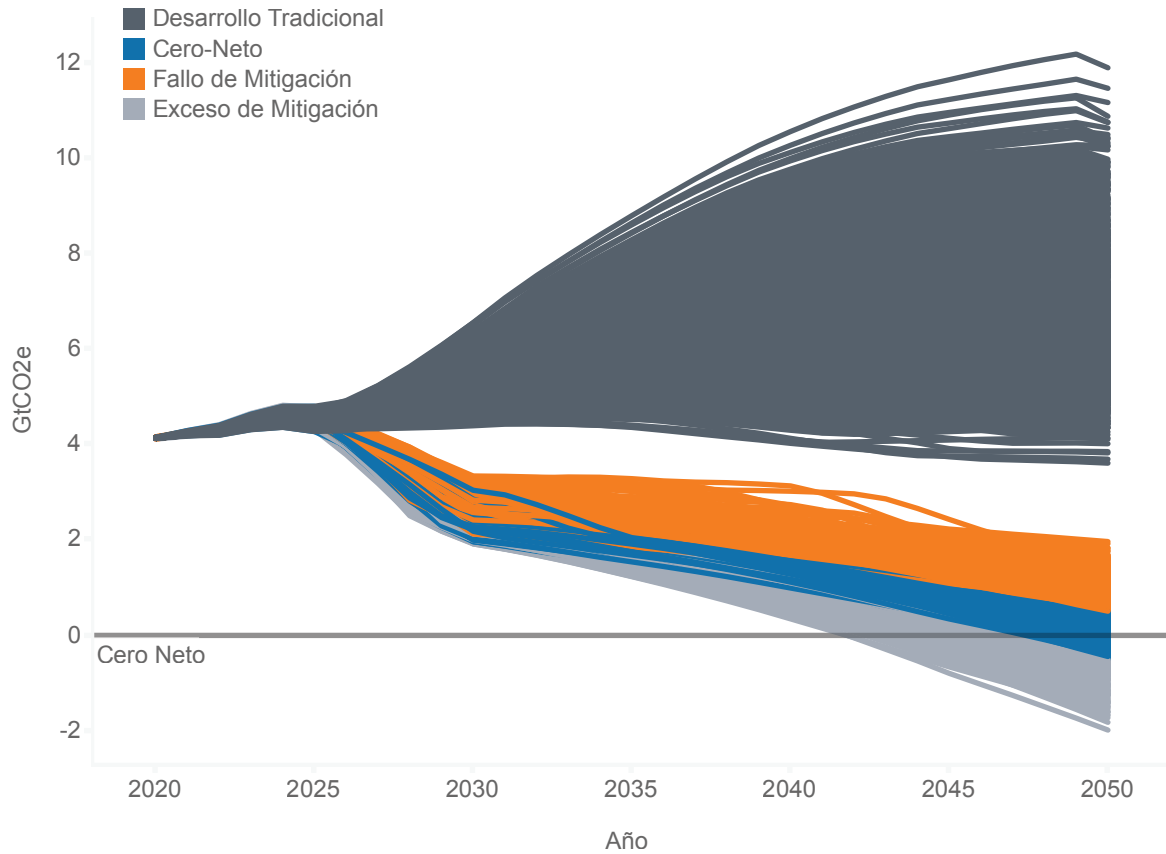


Figura 4.4 Trayectorias de emisiones de 1.000 variantes de Acciones Críticas en medio de la incertidumbre.

¿Qué combinación de condiciones amenaza más los objetivos de carbono-neutralidad?

Utilizamos las técnicas de descubrimiento de escenarios de RDM para describir combinaciones específicas de transformaciones y condiciones exógenas que llevan a las trayectorias de las Acciones Críticas a alcanzar o no la carbono neutralidad. La figura 4.5 muestra las variantes de las Acciones Críticas. En consonancia con la figura 4.4., en 2050 las trayectorias que alcanzan el cero neto son azules; las que no llegan al cero neto son naranjas, y las que sobrepasan el cero neto son grises.

Encontramos dos fuerzas opuestas en juego. La primera es el grado de aplicación de las acciones críticas de detener la deforestación y cambiar los patrones de producción de alimentos para 2050. La figura 4.4 muestra esto como un nivel medio de implementación de estas transformaciones en el eje vertical. Implementar estas transformaciones a niveles más altos significa que queda más tierra forestal disponible para secuestrar y compensar las emisiones residuales en otros sectores, lo que hace más probable que se alcance la carbono-neutralidad.

CAPÍTULO 4

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

La segunda es la medida en que las incertidumbres exógenas de la productividad ganadera y las tasas de secuestro forestal determinan la capacidad de los bosques para expandirse y compensar las emisiones. La figura 4.5 muestra esto en el eje horizontal como un cambio medio en las tasas de productividad ganadera (cabezas por hectárea) y las tasas de secuestro (CO₂ por hectárea) en relación con los supuestos nominales. A medida que disminuye la productividad, se necesita una mayor superficie forestal para satisfacer cualquier demanda de carne de vacuno, lo que aumenta la deforestación. A medida que disminuyen las tasas de secuestro, cada hectárea de bosque es menos eficaz como sumidero de emisiones.

Que se alcance la carbono-neutralidad depende del equilibrio relativo de estas fuerzas. A medida que nos acercamos a la esquina superior derecha de la figura 4.5, las menores tasas de deforestación, el menor consumo de carne de vacuno y la mayor productividad de los pastos y los bosques conducen a mayores probabilidades de alcanzar el cero neto en 2050 o antes.

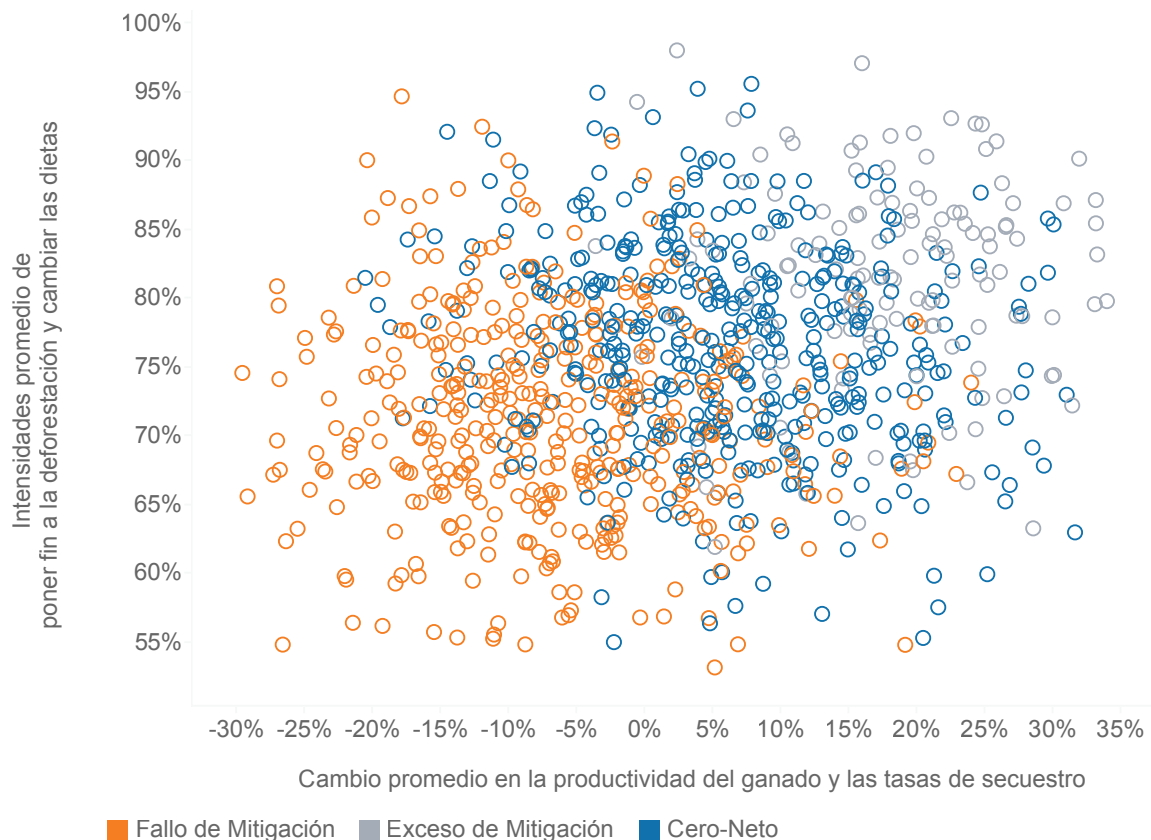


Figura 4.5 Condiciones que impulsan las emisiones de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre.

¿Qué estrategia alcanza con solidez los objetivos de cero emisiones netas?

Las técnicas de descubrimiento de escenarios de RDM pueden ayudar a resumir la información de estos resultados e identificar las áreas de vulnerabilidad y solidez. La figura 4.6 reproduce la figura 4.5 y destaca dos regiones de interés. A la izquierda hay una región vulnerable en la que el 90% de las trayectorias no alcanzan el cero neto. En esta región, los factores estresantes de la reducción de la productividad y las tasas de secuestro no se compensan con mayores niveles de aplicación para acabar con la deforestación y cambiar la producción y el consumo de carne.

A la derecha de la figura 4.6 hay una región de solidez. Muestra que una implementación suficiente de las transformaciones de poner fin a la deforestación y cambiar la producción y el consumo de carne proporciona solidez frente a estos factores de estrés. Hay 270 trayectorias que tienen una implementación de estas dos transformaciones críticas del 80% o superior (la zona sombreada de la figura). En estas trayectorias, la producción y el consumo de carne se reducen en un 40% y la deforestación se frena para 2030 a 780,000 ha/año. Aproximadamente el 85% de estas trayectorias alcanzan o sobrepasan emisiones netas cero en 2050, independientemente del cambio en las tasas de productividad y secuestro exploradas.

Este análisis sugiere que la productividad ganadera y las tasas de secuestro forestal pueden ser vientos en contra difíciles de navegar hacia las emisiones netas cero, pero que los esfuerzos energéticos para detener la deforestación y cambiar la producción de alimentos y los patrones de consumo hacia alimentos que emitan menos, junto con las transiciones a las energías renovables y los cambios de combustible en el transporte, pueden proporcionar un camino sólido hacia las emisiones netas cero.

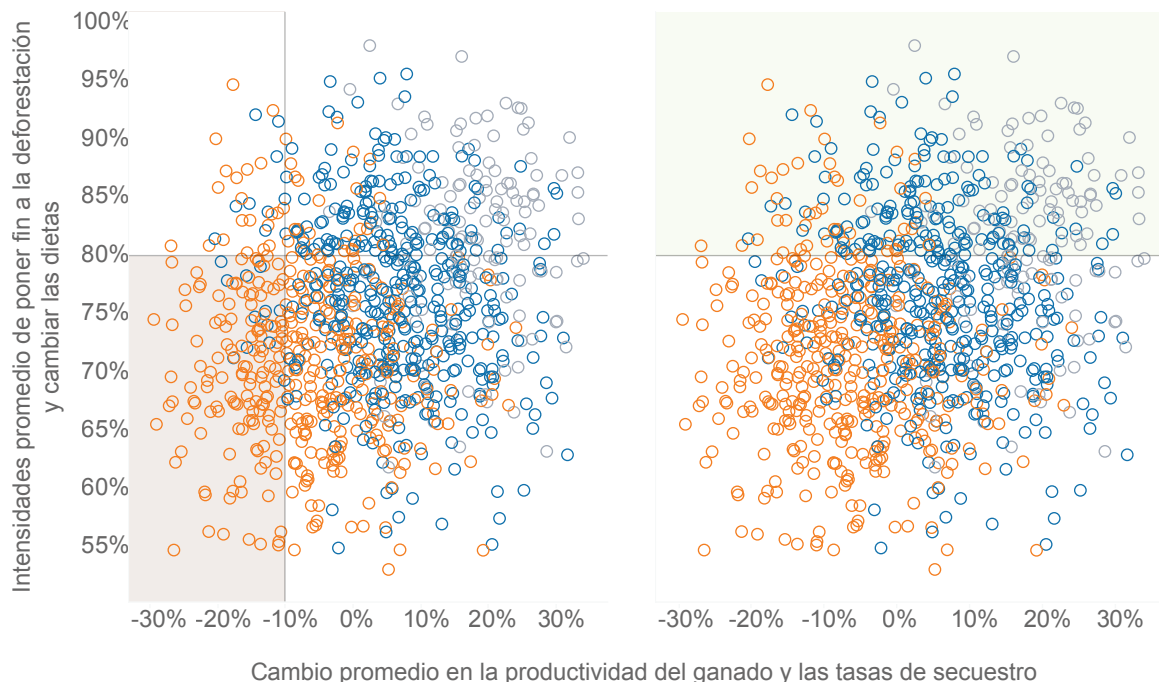


Figura 4.6 Condiciones vulnerables (izquierda) y niveles sólidos de aplicación (derecha) de las acciones críticas.

Costos y beneficios de la descarbonización de América Latina y el Caribe

A continuación examinamos las implicaciones económicas de la descarbonización de la región. Evaluamos la gama de costos y beneficios que podrían derivarse de la aplicación de las estrategias de Acción Crítica, las condiciones que podrían dar lugar a costos netos para la región y a quién corresponden esos costos y beneficios.

¿Cuál es el abanico de costos y beneficios de alcanzar la carbono-neutralidad con esta estrategia?

La figura 4.7 muestra los beneficios netos descontados (eje horizontal) frente a las emisiones netas en 2050 (eje vertical) para cada una de las trayectorias de las Acciones Críticas de la sección anterior. Las marcas están sombreadas en función de si alcanzan, sobrepasan o no alcanzan el cero neto en 2050. Además, las marcas se representan con círculos cuando los beneficios netos son positivos (a la derecha de la línea de referencia en 0) y con cuadrados cuando los beneficios netos son negativos (es decir, las estrategias suponen un coste neto).

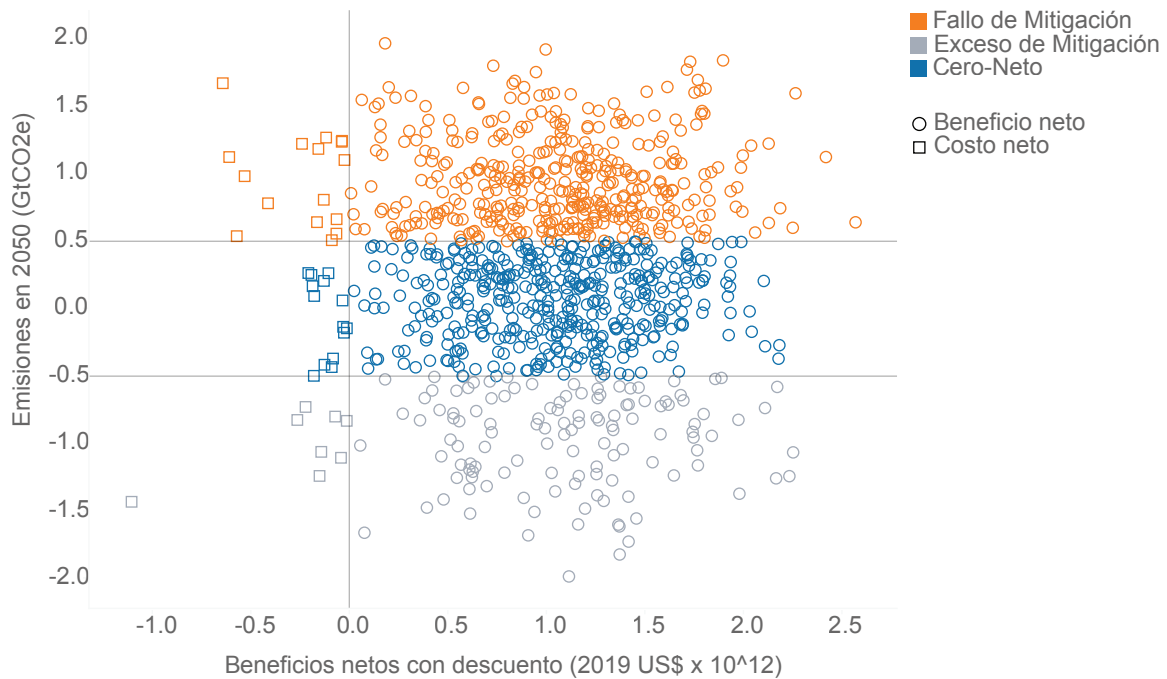


Figura 4.7 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre.

La figura 4.7 muestra en primer lugar que el 96% de las trayectorias de las Acciones Críticas dan lugar a beneficios netos positivos, y que la mediana de los beneficios netos en todas las trayectorias es de 1 billón de dólares con un máximo de 2,5 billones de dólares. Este nivel de beneficios no guarda relación con las reducciones de emisiones logradas (una regresión simple entre emisiones y beneficios tiene un valor R-cuadrado de 10⁻⁵ y un valor p de 0,8). Esto sugiere que las Acciones Críticas no sólo son robustamente beneficiosas en comparación con un futuro con Acciones Tradicionales, sino que superar el cero neto no se asocia con menores beneficios netos.

¿Qué condiciones pueden hacer que la descarbonización suponga costos netos?

Sólo hay 38 trayectorias de 984 en las que las variantes de Acciones Críticas suponen costos netos. Nuestro análisis de estas trayectorias no revela ningún conjunto específico y resumible de impulsores de alto costo. Cada una presenta una combinación única de impulsores exógenos de emisiones, efectos de transformación e incertidumbres de costos. Esto es similar a los hallazgos de Groves et al. (2020), que analizaron los costos y beneficios del plan de descarbonización de Costa Rica y encontraron pocos futuros de costos netos, y las condiciones que llevaron a ellos fueron difíciles de resumir.

¿A quién corresponden los costos y los beneficios?

La figura 4.8 describe la gama de beneficios en todos estos resultados por categoría de costos y beneficios utilizada en el capítulo 3. Varias categorías de beneficios son positivas en todos los futuros: seguridad sanitaria y productividad; contaminación evitada; servicios ecosistémicos; y costos de combustible. Esto es coherente con el hecho de que las estrategias de Acciones Críticas reducen la dependencia de los combustibles fósiles y aumentan la forestación, con los correspondientes beneficios en esas categorías. Los beneficios en términos de inversión sectorial son, por definición, negativos en todos los futuros, ya que esta categoría recoge los costos del capital y de otras inversiones.

Los beneficios en las demás categorías varían según el futuro. El sector eléctrico puede experimentar costos netos si los costos de capital, en particular para la transmisión y las mejoras del sistema, son extremadamente elevados y no se ven compensados por el mantenimiento y el ahorro en costos de combustible. En la agricultura, el impacto neto de la aplicación de las Acciones Críticas sobre la producción suele ser positivo, pero puede ser negativo en algunos futuros, si el valor perdido de la ganadería no se ve superado por el aumento de la producción en los cultivos. Los otros ahorros o costos del sector incluyen la evitación de la actividad industrial debido a un uso más eficiente de los materiales, los ahorros en mantenimiento derivados de la electrificación y los costos del sistema de transporte por modos. Que éstos den lugar a costos netos o a beneficios netos depende del grado de aplicación de las transformaciones relacionadas y de los valores exógenos de los costos y beneficios por unidad de aplicación.

CAPÍTULO 4

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

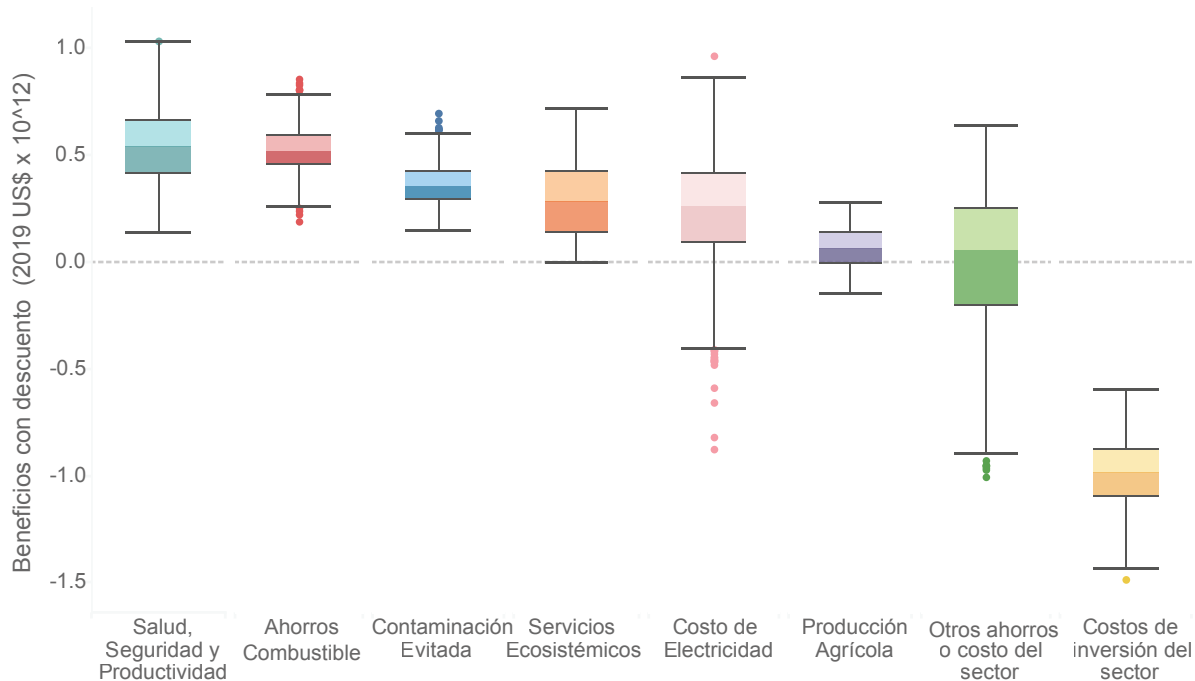


Figura 4.8 Principales categorías de costos y beneficios en condiciones de incertidumbre.

La figura 4.8 clasifica los beneficios en aquellos en los que incurren los actores de nuestros sectores clave: agricultura, edificios, industria, transporte y sectores de producción de energía (diagrama de recuadros de la derecha), y los beneficios que son externos a esos sectores (diagrama de recuadros de la izquierda), incluyendo la contaminación evitada; otros beneficios para la salud, y la productividad; y los servicios de los ecosistemas. Estos beneficios tienden a acumularse en el público y en el sistema sanitario.

La figura 4.9 muestra que mientras que los beneficios externos son grandes y positivos en todos los escenarios, los beneficios internos varían. En algunos futuros, los actores pueden disfrutar de beneficios internos positivos, sobre todo cuando el ahorro de costos energéticos recupera las inversiones técnicas. Pero muchos futuros suponen costos técnicos netos para los actores del sector. Mientras que los beneficios externos casi siempre superan estos costos, y normalmente por un amplio margen (véase la figura 4.8), el coste para los actores del sector puede prohibir la acción climática, independientemente de los beneficios más amplios que pueda obtener una nación.

Esto señala la importancia de las intervenciones gubernamentales para redistribuir los beneficios a través de la sociedad, mediante la política fiscal, la estructura tarifaria y la política social. Por ejemplo, los gobiernos podrían internalizar algunos de los beneficios sociales de la reducción de la congestión y la contaminación atmosférica ajustando los impuestos sobre el combustible y la propiedad de vehículos (por ejemplo, Victor-Gallardo et al., 2022) o reformando las subvenciones a los combustibles fósiles y reforzando al mismo tiempo las transferencias de efectivo o subvencionando la adopción de tecnologías limpias (Missbach et al., 2024).

CAPÍTULO 4

Una estrategia robusta para alcanzar la carbono-neutralidad en América Latina y el Caribe

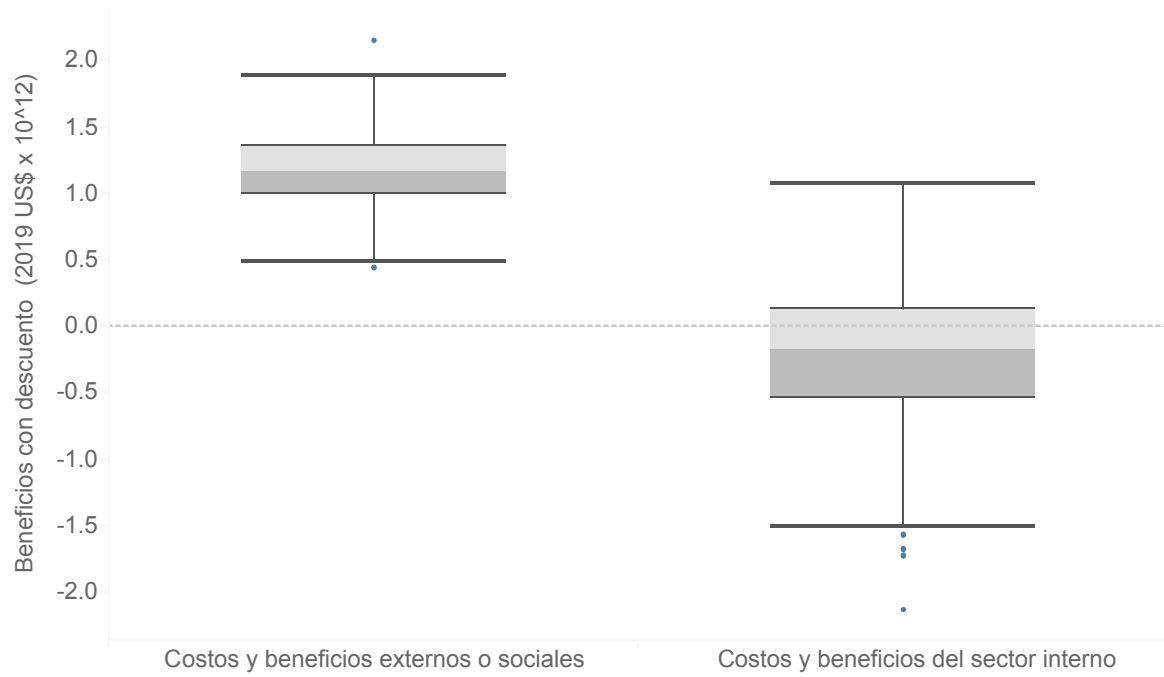


Figura 4.9 Costos y beneficios internos y externos.

Costos y beneficios de lograr
la carbono-neutralidad en
América Latina y el Caribe

5

CAPÍTULO

Resultados nacionales

Este capítulo explora cómo las estrategias regionales de los capítulos 3 y 4 tienen diferentes resultados e implicaciones para cada país en función de sus diferencias socioeconómicas, geográficas, de desarrollo y de otro tipo.

Ilustramos los resultados en tres países: Brasil, la República Dominicana y México. Para cada país proporcionamos un resumen de su NDC, centrándonos en sus objetivos de mitigación y sus acciones declaradas para alcanzar estos objetivos. También, si están disponibles, discutimos sus objetivos de LTS. A continuación, resumimos los resultados a nivel de país de las cinco estrategias analizadas en el capítulo 3, y después de la estrategia de Acciones Básicas descrita en el capítulo 4.

Estas diferencias reiteran que, aunque algunas acciones comunes son fundamentales para alcanzar la carbono-neutralidad, los niveles específicos de aplicación de estas y otras acciones en toda la economía dependerán de las condiciones locales, y su éxito se verá desafiado por diferentes incertidumbres y restricciones nacionales. En general, la planificación de la descarbonización no puede ser un ejercicio de copiar y pegar; debe basarse en la deliberación nacional y adaptarse a las prioridades y retos locales.

Brasil

Brasil, la mayor economía de América Latina, se enfrenta a diversos retos económicos, políticos y medioambientales en el contexto del cambio climático. Económicamente, Brasil depende de industrias como la agricultura, la minería y la producción de energía, que contribuyen significativamente a las emisiones de GEI y a la degradación medioambiental. Brasil ha avanzado en la lucha contra el cambio climático a través de los compromisos adquiridos en el marco del Acuerdo de París y la aplicación de políticas nacionales para reducir la deforestación de la Amazonia. Sin embargo, los desafíos políticos y los intereses contrapuestos suponen barreras para una aplicación y regulación efectivas (Gallo y Albrecht, 2019).

Desde el punto de vista medioambiental, Brasil alberga el Amazonas, la mayor selva tropical del mundo. El Amazonas desempeña un papel fundamental en la regulación del clima mundial, ya que almacena alrededor del 25% del carbono de biomasa por encima del suelo del mundo, el 64% del cual se encuentra en Brasil (Fawcett et al., 2023). La deforestación, la tala ilegal y la invasión de tierras suponen importantes amenazas para la biodiversidad de la región y su capacidad para cumplir sus objetivos de emisiones de GEI (Cardil et al., 2020). Los esfuerzos de adaptación requieren prácticas sostenibles de uso de la tierra, medidas de conservación y un aumento de la resiliencia en las comunidades vulnerables (Niemeyer y Vale, 2022; Di Gregorio et al., 2016). La posición única de Brasil como guardián del medio ambiente mundial y principal emisor de GEI pone de relieve la necesidad de estrategias globales que integren el desarrollo económico, la voluntad política y la protección medioambiental para abordar los complejos retos de la mitigación y la adaptación al cambio climático (Gallo y Albrecht, 2019).

En 2020, las emisiones totales de Brasil se situarán en 1.45 GtCO₂eq, lo que representa el 2.92% de las emisiones mundiales, con un descenso del 28% respecto a 2005. La NDC de Brasil se centra en los principales sectores que contribuyen a sus emisiones. Los principales impulsores de las emisiones identificados en el escenario habitual (BAU) de la NDC incluyen la agricultura, la energía, el cambio de uso del suelo y la silvicultura, los residuos y los procesos industriales. La agricultura por sí sola representa el 35.3% de las emisiones, seguida de la energía con un 29.9% y el cambio de uso de la tierra y la silvicultura con un 27.5%. Para 2025, Brasil se compromete a reducir las emisiones en un 37% en comparación con los niveles de 2005, mientras que aspira a una reducción sustancial de las emisiones de GEI del 50% para 2030. Además, Brasil prevé alcanzar la carbono-neutralidad para 2050 (CMNUCC, 2022a). Sin embargo, la calificación general de Climate Action Tracker de las políticas y compromisos climáticos de Brasil se considera actualmente insuficiente, y requiere mejoras sustanciales para cumplir su objetivo de la NDC para 2030 (Climate Action Tracker, 2022a).

Para mitigar las emisiones, Brasil ha puesto en marcha diversas acciones en sectores clave. En agricultura y silvicultura, el país ofrece incentivos para reducir la deforestación, potencia los esfuerzos de forestación y reforestación, promueve prácticas agrícolas sostenibles, establece normas de sostenibilidad para el uso de la biomasa y fomenta la reducción de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O procedentes de las actividades agrícolas. En el sector de la electricidad y la calefacción, Brasil ha establecido un plan de apoyo a las energías renovables, centrándose en infraestructuras de centrales eléctricas de alta eficiencia, invirtiendo en el desarrollo de infraestructuras de red, explorando alternativas no renovables bajas en carbono y fomentando el almacenamiento de electricidad. En el transporte, el país promueve los vehículos pesados y ligeros energéticamente eficientes, fomenta el cambio al transporte terrestre de bajas emisiones y pretende cambiar el reparto modal, entre otros. El sector industrial recibe ayudas para la eficiencia energética en la producción, la eficiencia de los materiales, el establecimiento de normas de rendimiento y equipamiento, incentivos para reducir las emisiones de metano procedentes de la exploración y producción de combustibles, la reducción del metano de los vertederos y un plan de apoyo a la CCS y a las iniciativas de cambio de combustible. Por último, en los edificios, Brasil se centra en la aplicación de normas de rendimiento y equipamiento, al tiempo que proporciona apoyo a los aparatos de alta eficiencia (Bezerra et al, 2021; Silvero et al, 2019). Brasil aún no ha presentado un LTS que pueda perfilar sus planes para alcanzar la carbono-neutralidad y la sostenibilidad en las próximas décadas.

Nuestros resultados para Brasil están altamente correlacionados con los resultados regionales, dado que Brasil constituye el 40% de las emisiones de la región. La figura 5.1 muestra los resultados de nuestro análisis del capítulo 3 para Brasil. En condiciones iniciales, el sector de la agricultura y la silvicultura y otros usos de la tierra representa la mayor parte de las emisiones del país. Ninguna de las tres categorías individuales de transformación analizadas en este informe (Mejoras Incrementales, Soluciones del Lado de la Oferta y Cambio en el Consumo) alcanza la carbono-neutralidad, aunque el Cambio en el Consumo se acerca, ya que devuelve enormes cantidades de tierra a bosques secundarios que pueden compensar las emisiones en el resto de la economía. Sin embargo, tomando Todas las acciones se alcanza el objetivo de neutralidad de carbono para 2050, lo que sugiere que las acciones de todas estas categorías pueden permitir a Brasil alcanzar sus objetivos.

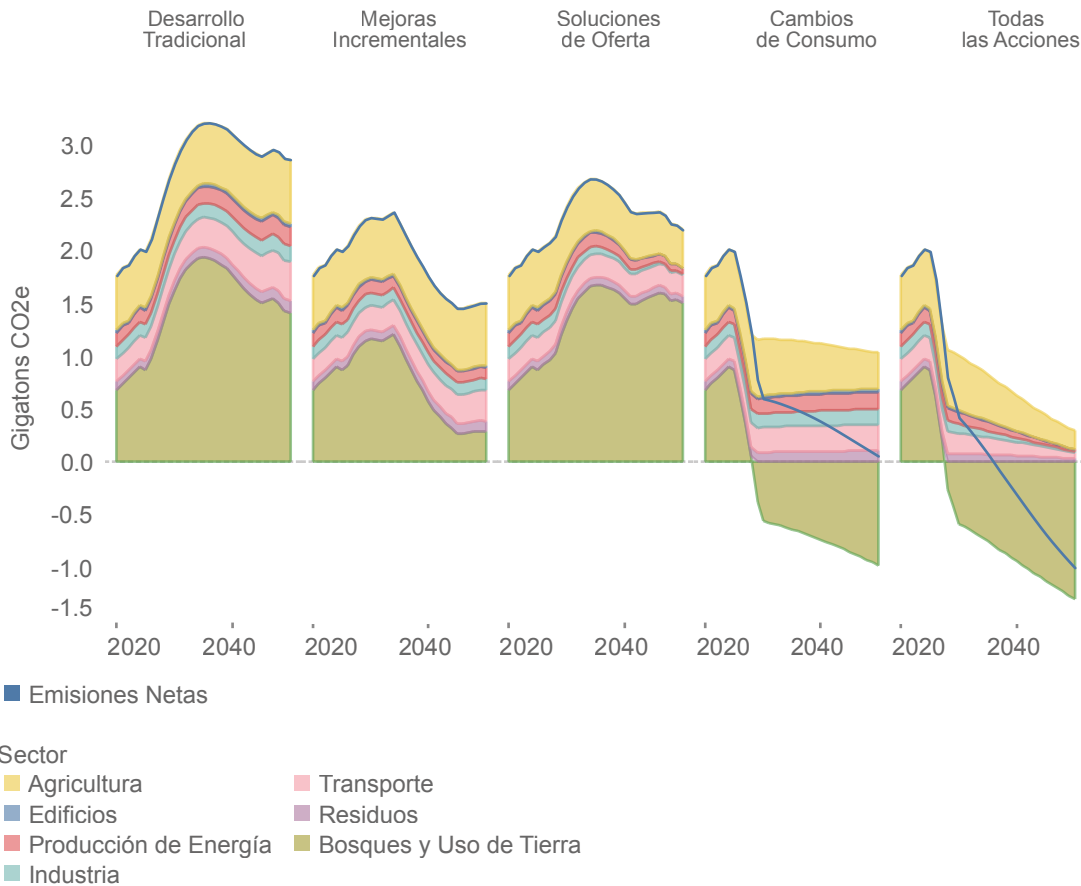


Figura 5.1 Emisiones bajo aplicación máxima de transformaciones por categoría, Brasil.

Constatamos que Brasil se beneficiaría de la aplicación de las transformaciones sectoriales analizadas en este informe. Como muestra la figura 5.2, todas las categorías de transformaciones arrojan beneficios netos positivos para Brasil bajo supuestos nominales. Los mayores beneficios se generarán en las categorías de contaminación evitada, salud, seguridad y productividad, y ahorro en otros sectores. La aplicación de todas las medidas requeriría 709,000 millones de dólares (1.92% del PIB actual al año) en inversiones sectoriales, lo que arrojaría 1 billón de dólares en beneficios netos.

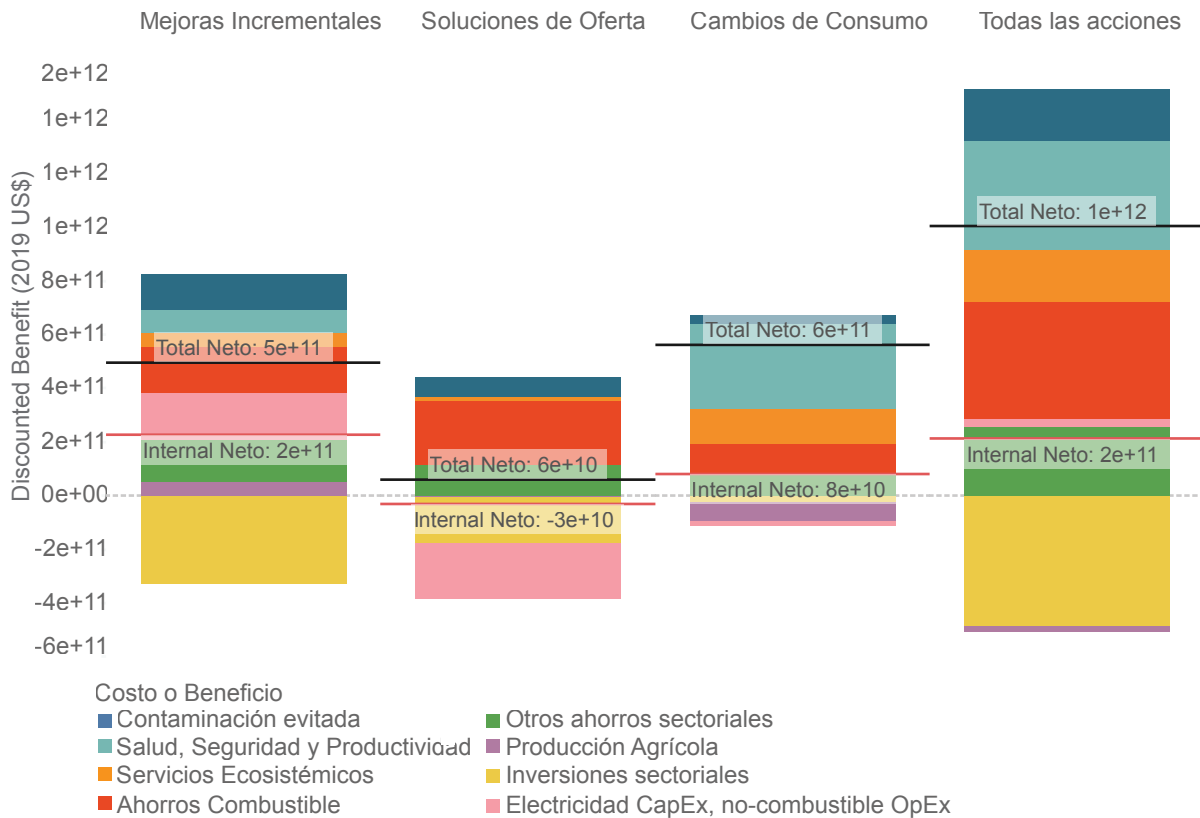


Figura 5.2 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías, Brasil.

Las figuras 5.3 y 5.4 presentan los resultados bajo incertidumbre para Brasil y proporcionan versiones a nivel de país de nuestro análisis del capítulo 4. La figura 5.3 muestra las emisiones a lo largo del tiempo y bajo incertidumbre de 1,000 variantes de la estrategia de Acciones Críticas descrita en el capítulo 4: cambiar los patrones de producción de alimentos, alterar la deforestación, descarbonizar la producción de electricidad y electrificar el transporte. Aproximadamente el 90% de estas variantes alcanzan o sobrepasan las emisiones netas cero para 2050, y sólo el 10% de las trayectorias se quedan cortas respecto a este objetivo. La figura 5.4 muestra que esta estrategia produce beneficios netos positivos en casi todas las variantes y condiciones. También en este caso, la reducción de emisiones se beneficia de los esfuerzos por aumentar la productividad agrícola, cambiar la dieta hacia alimentos que requieren menos espacio para crecer y forestar la tierra liberada.

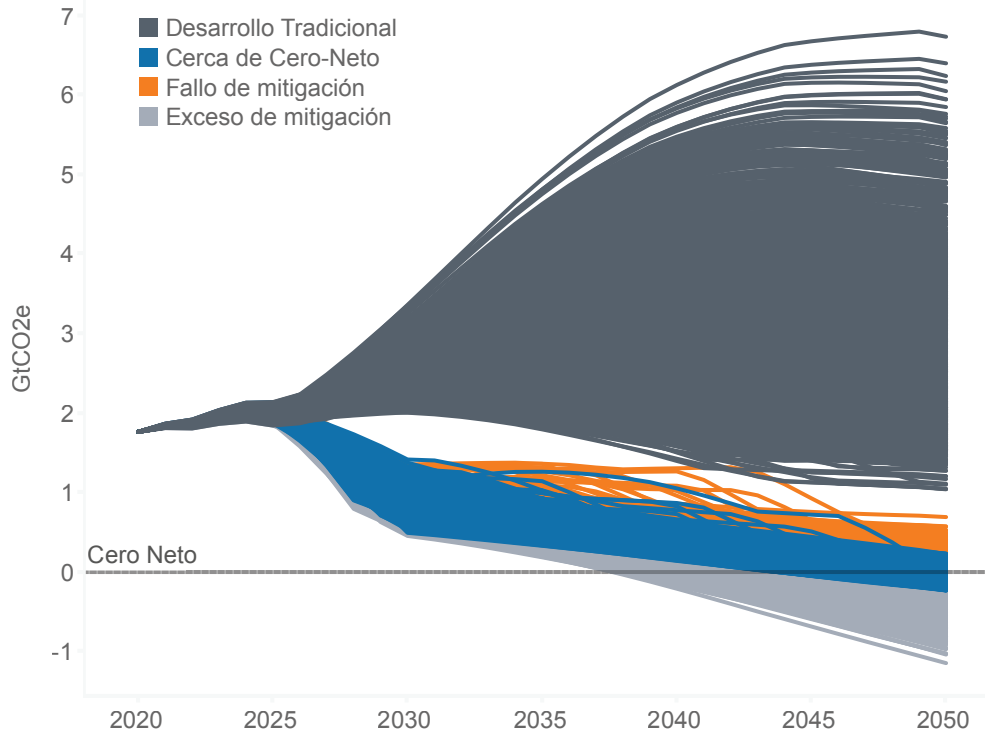


Figura 5.3 Trayectorias de emisiones de 1.000 variantes de Acción Crítica en medio de la incertidumbre, Brasil.



Figura 5.4 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre, Brasil.

La figura 5.5 identifica las combinaciones de intensidades de política y condiciones exógenas que llevan a la estrategia de Acciones Críticas a no alcanzar las cero emisiones netas. En el caso de Brasil, estas condiciones vulnerables se asemejan a las condiciones vulnerables identificadas para el conjunto de la región debido a la importancia de Brasil tanto en emisiones como en potencial de secuestro. En este sentido, cambiar la producción agrícola y el consumo y detener la deforestación son transformaciones críticas para alcanzar la carbono-neutralidad, objetivo puede ponerse en riesgo por menor productividad ganadera y menor potencial de secuestro de los bosques primarios y secundarios.

La figura 5.5 destaca una región vulnerable en la esquina inferior izquierda, donde las tasas de productividad y de secuestro son inferiores al 20% del valor nominal y las transformaciones se aplican a menos del 40% del máximo. El 68% de las trayectorias de esta región no logran alcanzar el cero neto. Esta región describe el 53% de las trayectorias que no logran alcanzar los objetivos de carbono-neutralidad.

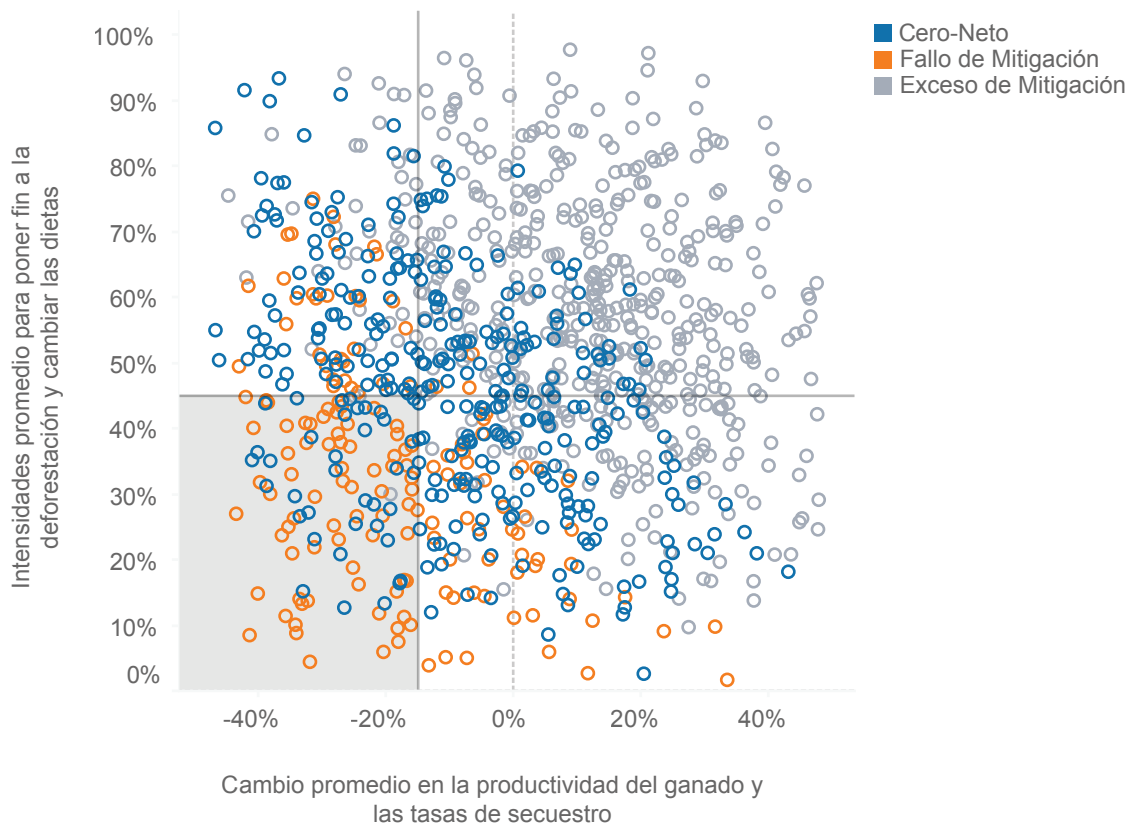


Figura 5.5 Condiciones vulnerables de las acciones críticas, Brasil.

República Dominicana

La economía de la República Dominicana depende de industrias como el turismo, la agricultura y la manufactura, que son vulnerables a los impactos del cambio climático. La subida del nivel del mar, el aumento de la intensidad de las tormentas y el cambio de los patrones de precipitaciones suponen riesgos para las infraestructuras costeras, la productividad agrícola y los recursos hídricos (OMS, 2021). La República Dominicana ha demostrado su compromiso para abordar el cambio climático, y el gobierno ha puesto en marcha políticas e iniciativas para promover las energías renovables, mejorar las normativas medioambientales y aumentar la resiliencia en las zonas vulnerables. Sin embargo, los retos relacionados con la coordinación política y el financiamiento dificultan la aplicación de estrategias integrales contra el cambio climático. Desde el punto de vista medioambiental, los diversos ecosistemas de la nación, incluidos los arrecifes de coral y los manglares, están amenazados por el cambio climático, lo que provoca la pérdida de hábitats, la erosión costera y la pérdida de biodiversidad. Los esfuerzos de adaptación requieren prácticas sostenibles de gestión de la tierra y el agua, medidas de conservación y la protección de los recursos naturales (de Municipios et al, 2017).

En 2020, las emisiones totales del país ascendieron a 40 MtCO₂eq, lo que representa el 0,08% de las emisiones mundiales. En comparación con el año 2000, las emisiones se han duplicado. La agricultura, la electricidad, el transporte y los procesos industriales fueron los principales sectores emisores, con una contribución del 26, 25, 20 y 10% respectivamente (Climate Watch Data, 2020a).

La NDC actualizada de la República Dominicana pretende lograr una reducción del 27% en comparación con el BAU para 2030 (UNFCCC, 2022b). Para cumplir sus compromisos, la República Dominicana está implementando varias acciones en todos los sectores económicos, a través de incentivos a la inversión privada. En el sector de la electricidad y la calefacción, el país ha establecido un objetivo de energías renovables que pretende dar prioridad al desarrollo de infraestructuras de red y al almacenamiento de electricidad. En el transporte, se apoyan los biocarburos y se aplica un impuesto sobre los carburantes y/o las emisiones. Sin embargo, en los sectores de la agricultura y la silvicultura, la industria y la construcción, no se han articulado acciones específicas de mitigación (Climate Policy Database, 2019a). La República Dominicana aún no ha presentado un LTS que esboce sus planes integrales para alcanzar la neutralidad climática y la sostenibilidad a largo plazo (CMNUCC, 2023b).

Nuestros resultados para la República Dominicana difieren significativamente de los resultados regionales. En primer lugar, la figura 5.6 muestra que las categorías individuales de transformación (mejoras incrementales, soluciones del lado de la oferta y cambio en el consumo) pueden ayudar al país a reducir las emisiones en al menos un 27% en comparación con el desarrollo tradicional. Al mismo tiempo, es posible ver que esos esfuerzos no serán suficientes para lograr la carbono-neutralidad.

Ninguna de las estrategias de desarrollo del modelo logra la neutralidad de carbono para 2050, ni siquiera si se toman todas las medidas. En comparación con toda la región -o con el Brasil descrito en la sección anterior- la producción de energía, el transporte y la industria en la República Dominicana desempeñan un papel mucho más importante en las emisiones actuales.

El país también tiene menos potencial para compensar las emisiones mediante la forestación. Si la isla, con limitaciones de tierras, pretende alcanzar un objetivo nacional de emisiones netas cero, se necesitarán más reducciones de emisiones de las que hemos modelado para 2050 en la agricultura, el transporte y la gestión de residuos.

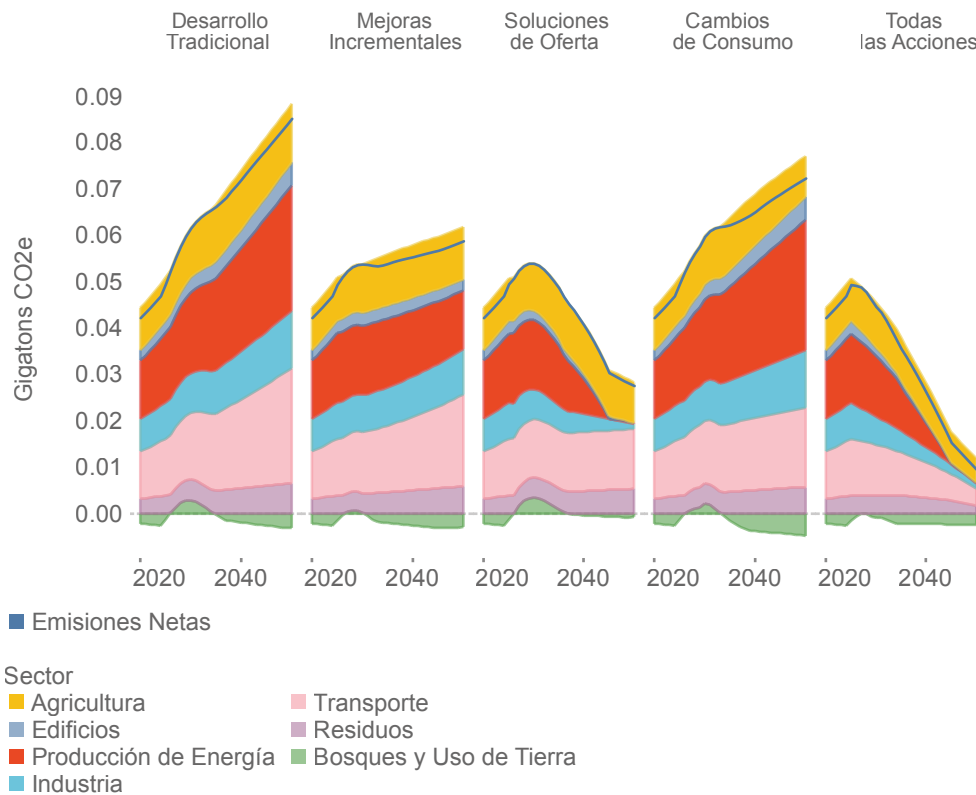


Figura 5.6 Emisiones bajo aplicación máxima de transformaciones por categoría, República Dominicana.

Por ejemplo, nuestras simulaciones muestran que hay margen para reducir aún más las emisiones en el transporte. La figura 5.7 muestra el consumo de combustible en el sector bajo Desarrollo tradicional y Todas las acciones. Las reducciones en Todas las acciones son una combinación de reducciones en la demanda de energía resultantes de una mayor eficiencia energética del transporte, una mayor ocupación de los vehículos privados y cambios en el modo de transporte hacia el transporte público y los viajes no motorizados, así como la electrificación del transporte y el cambio de combustible hacia el hidrógeno. Podrían lograrse mayores reducciones de las emisiones si la parte restante de los combustibles convencionales utilizados (es decir, gasolina y diesel) se sustituye por electricidad o hidrógeno, o si mejora aún más el cambio modal. Cualquiera de las dos opciones podría ser más fácil de aplicar en la isla que en el conjunto de la región.

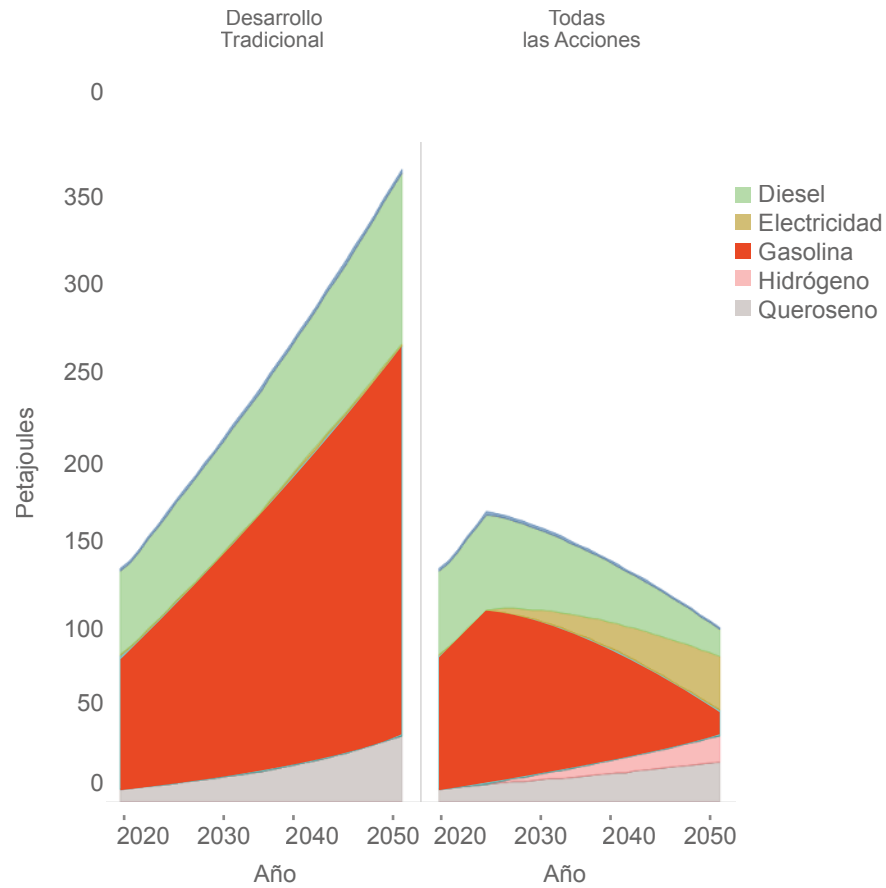


Figura 5.7 Demanda de combustible en el transporte según trayectorias seleccionadas, República Dominicana.

La figura 5.8 muestra los costos y beneficios estimados para la República Dominicana para estas categorías. Todas ellas, excepto las Soluciones del lado de la oferta, arrojan unos beneficios netos sólidos. Para las Soluciones del Lado de la Oferta, los beneficios de la contaminación evitada, el combustible y los ahorros de otros sectores son equivalentes a los costos de inversión sectorial requeridos. La aplicación de Todas las acciones requeriría una inversión de 30,000 millones de dólares entre 2025 y 2050 (aproximadamente el 1.6% del PIB actual cada año) y produciría unos beneficios netos de 59,000 millones de dólares.

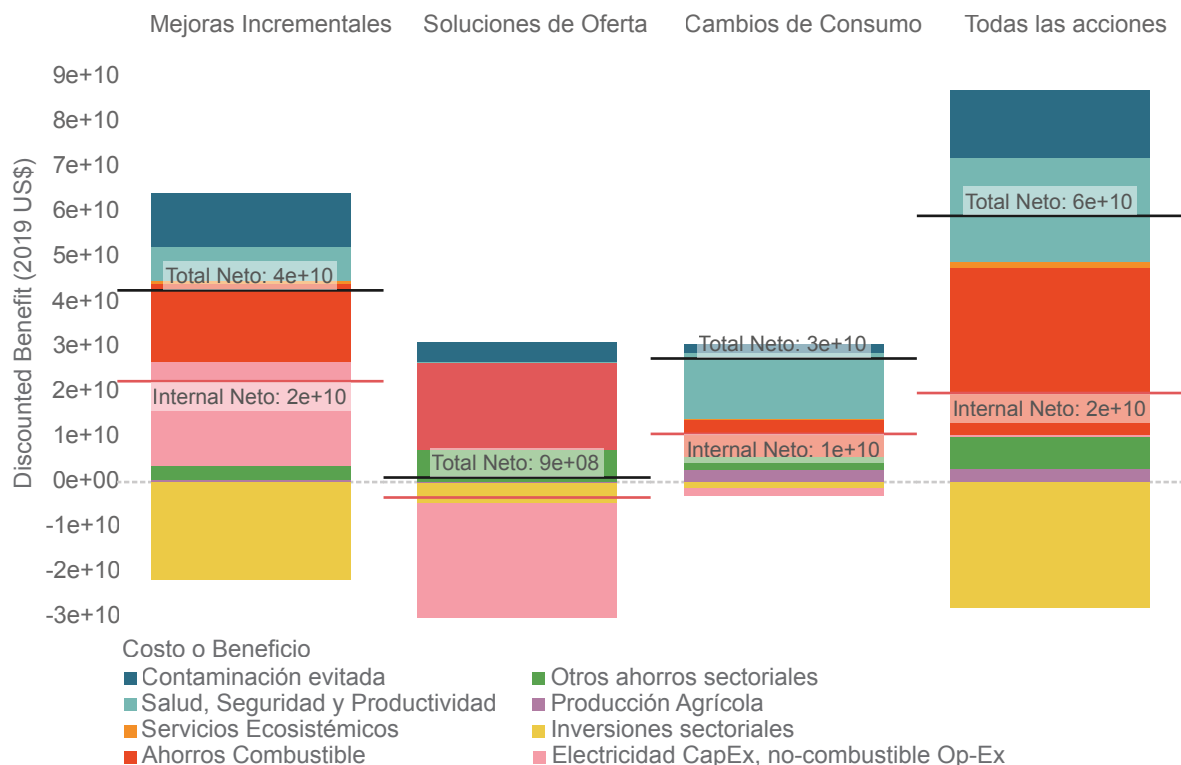


Figura 5.8 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías, República Dominicana.

La figura 5.9 muestra las emisiones a lo largo del tiempo y bajo incertidumbre de 1,000 variantes de la estrategia de Acciones Críticas descrita en el capítulo 4: cambiar los patrones de producción de alimentos, modificar la deforestación, descarbonizar la producción de electricidad y electrificar el transporte. Ninguna variante alcanza la carbono-neutralidad, lo que confirma que, aunque las acciones críticas pueden ser importantes para la descarbonización, puede ser necesaria una estrategia diferente para alcanzar los objetivos de descarbonización. La figura 5.10 muestra que los esfuerzos para descarbonizar aportan rendimientos económicos abrumadoramente positivos, incluso cuando no se alcanza el cero neto.

Realizamos un análisis de vulnerabilidad en trayectorias con emisiones superiores a 25 MtCO₂e en 2050. (Excluimos los beneficios netos en nuestros criterios, ya que muy pocos casos tienen beneficios netos negativos). Nuestro análisis de vulnerabilidad muestra que hay dos grupos de factores en juego y que difieren de los resultados regionales: el aumento de la producción industrial, de la demanda energética de los edificios y de la demanda de transporte de mercancías (eje horizontal) asociado al desarrollo y al crecimiento económico; y el nivel de medidas adoptadas para contrarrestar las emisiones aumentando el uso de energías renovables y electrificando el transporte (eje vertical). Cuanto mayor sea el aumento de la actividad económica en los edificios, la industria y el transporte de mercancías, mayor será el esfuerzo necesario para impulsar el cambio y reducir las emisiones en la energía suministrada a esos sectores.

La zona sombreada de la figura 5.11 muestra las condiciones vulnerables que llevan a las estrategias a no alcanzar el umbral de emisiones:

- El aumento de la actividad en estos sectores es superior al -10% de los supuestos nominales.
- El nivel de acción es colectivamente inferior al 70% del nivel máximo.

Estas condiciones se dan en el 78% de todas las trayectorias que incumplen los objetivos de emisiones, y el 90% de las trayectorias con estas condiciones incumplen los objetivos de emisiones. En términos más técnicos, estas condiciones tienen una densidad del 78% y una cobertura del 90%.

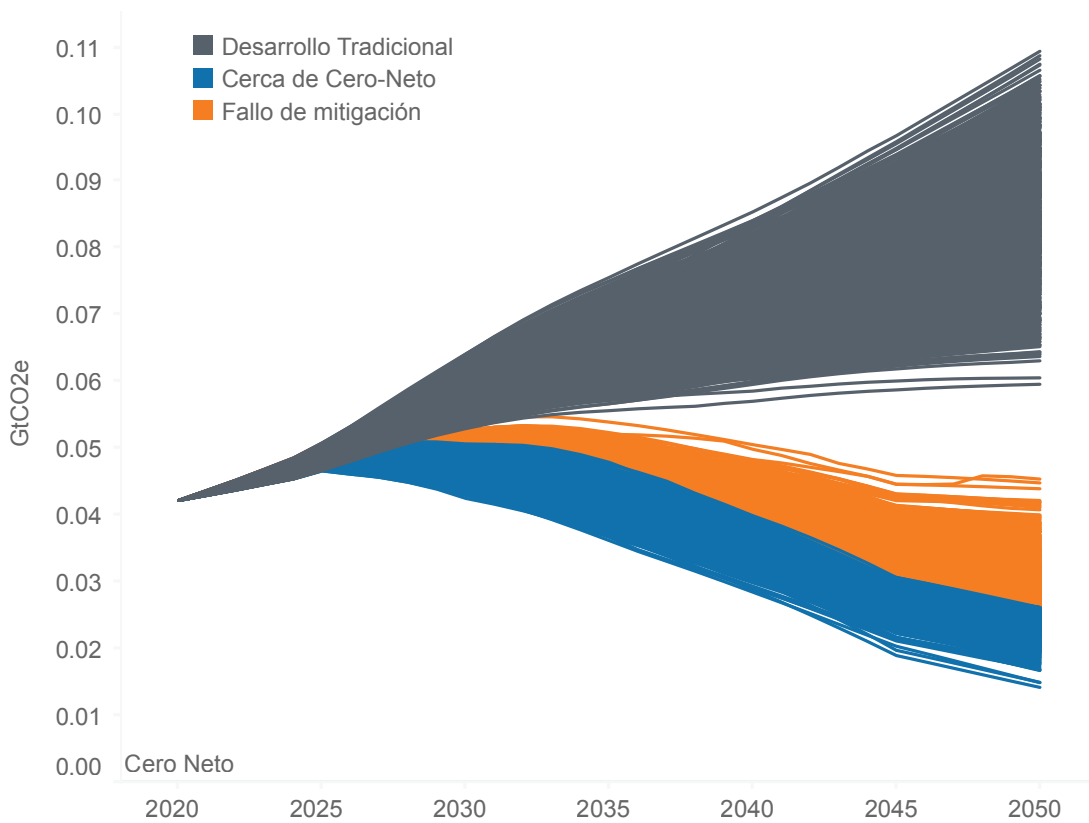


Figura 5.9 Trayectorias de emisiones de 1.000 variantes de Acción Crítica en medio de la incertidumbre, República Dominicana.

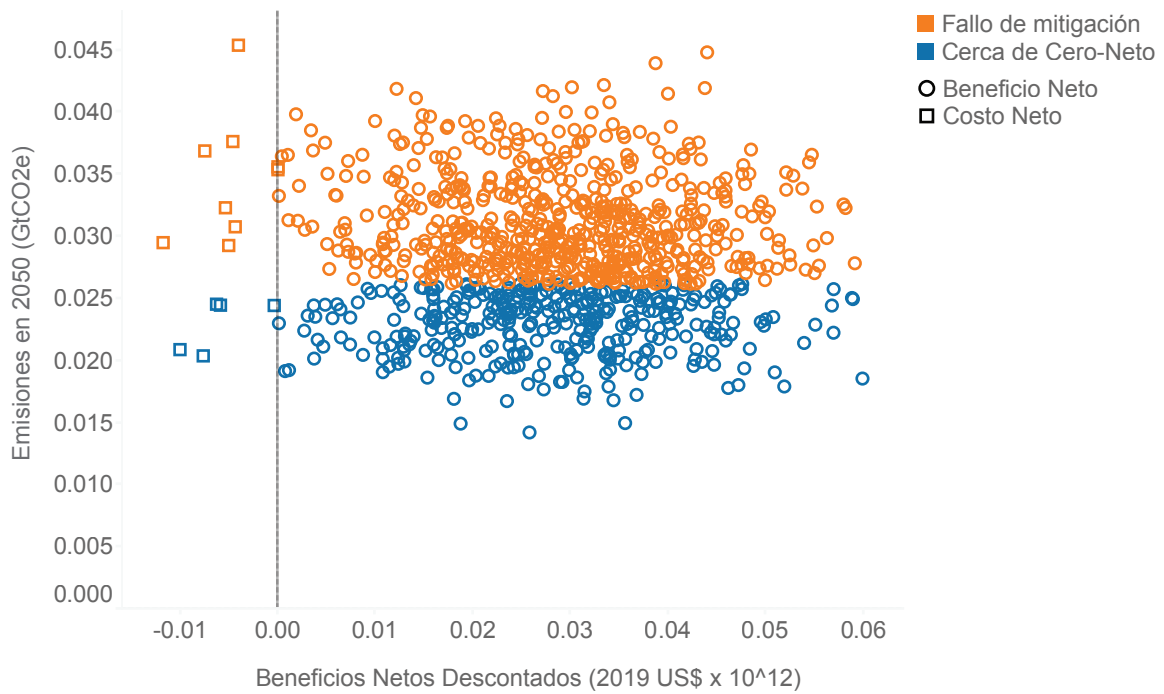


Figura 5.10 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre, República Dominicana.

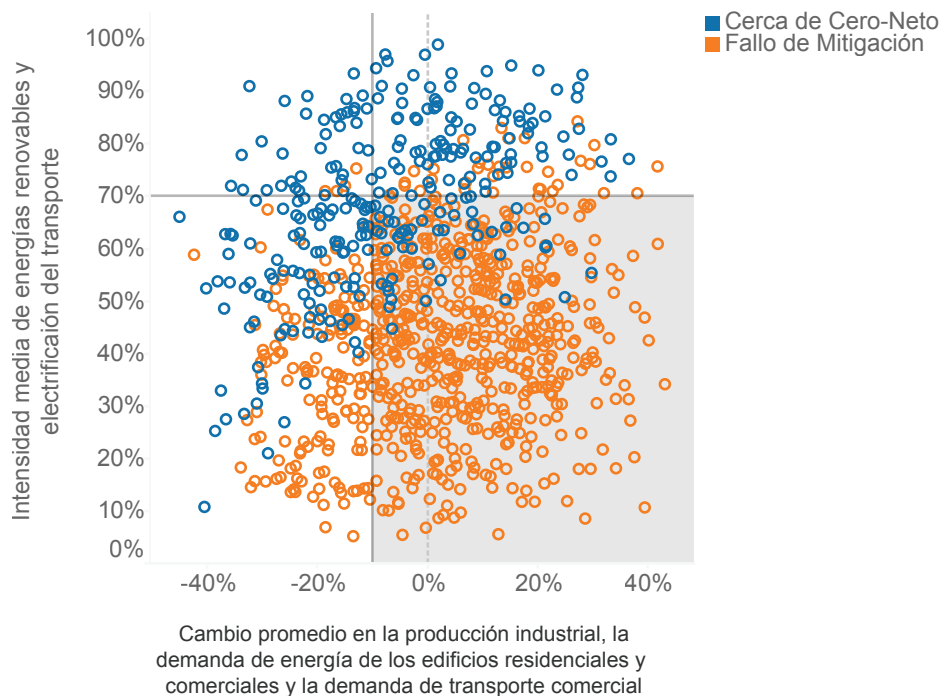


Figura 5.11 Condiciones vulnerables de las acciones críticas, República Dominicana.

México

La economía de México está estrechamente vinculada a industrias como la manufacturera, la producción de petróleo y el turismo. La transición a tecnologías con bajas emisiones de carbono, el fomento de las energías renovables y la adopción de prácticas sostenibles en estos sectores pueden contribuir a la reducción de las emisiones al tiempo que fomentan el crecimiento económico y la creación de empleo (Raihan y Tuspekova, 2022). México, de conformidad con el Acuerdo de París, ha puesto en marcha políticas para promover las energías renovables, mejorar la eficiencia energética y reducir la deforestación. Sin embargo, los retrasos políticos, las incoherencias de las políticas climáticas y una aplicación ineficaz siguen siendo retos cruciales (Ruiz-Rivera et al, 2017).

Desde el punto de vista medioambiental, los diversos ecosistemas y las comunidades vulnerables de México se ven afectados por los impactos del cambio climático, como el aumento de las temperaturas, la escasez de agua y la mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos. Los esfuerzos de adaptación se han centrado en la conservación de los ecosistemas, la gestión sostenible de la tierra y la mejora de la resiliencia en las zonas vulnerables (Escudero y Mendoza, 2021).

En 2020, las emisiones totales de México alcanzaron las 670 MtCO₂eq, lo que representa el 1.35% de las emisiones mundiales. Los principales impulsores de las emisiones en su escenario NDC BAU incluyen la energía, que contribuye con el 66% de las emisiones, seguida de la agricultura con el 16%, los residuos con el 8%, los procesos industriales con el 7%, y el cambio de uso del suelo y la silvicultura con casi el 3%. Las emisiones han crecido un 18% en comparación con el año de referencia de 2000.

La NDC de México establece el compromiso de reducir las emisiones de GEI en un 35% con respecto al escenario BAU y prevé que el 30% se logre con recursos nacionales y el 5% restante con cooperación internacional. Lamentablemente, la calificación global de las políticas y compromisos climáticos de México por parte del Climate Action Tracker es críticamente insuficiente. El país estima que con las políticas actuales podrá cumplir este objetivo de reducción del 35%; sin embargo, las emisiones seguirán aumentando hasta 2030 (Climate Action Tracker, 2022b).

Para mitigar las emisiones, la NDC de México planea implementar varias transformaciones en todos los sectores. En el sector de la electricidad y la calefacción, el país ha establecido un plan de apoyo a las energías renovables, se ha centrado en el desarrollo de infraestructuras de red, ha explorado alternativas no renovables bajas en carbono y ha puesto en marcha un plan de fijación de precios del carbono en la industria. En agricultura y silvicultura, México ofrece incentivos para reducir la deforestación, potencia los esfuerzos de forestación y reforestación, promueve prácticas agrícolas sostenibles y establece normas de sostenibilidad para el uso de la biomasa. Mientras tanto, el sector industrial apoya la eficiencia energética, los incentivos para reducir las emisiones de metano procedentes de la exploración y producción de combustibles, y la aplicación de normas de rendimiento y equipamiento. El sector del transporte se centra en el transporte de bajas emisiones, el apoyo a los vehículos energéticamente eficientes, la aplicación de un impuesto sobre el combustible y/o las emisiones, y el cambio modal.

En el sector de la edificación, México planea aplicar políticas para incentivar los electrodomésticos de alta eficiencia, las normas de rendimiento y equipamiento, los códigos de edificación y las construcciones de alta eficiencia.

El LTS de México propone lograr una reducción del 50% de las emisiones respecto a los niveles de 2000 para 2050. La estrategia alinea varios sectores como la planificación del uso del suelo, el desarrollo urbano, los edificios sostenibles, la energía, el transporte, la gestión de residuos y las políticas hídricas. Una revisión de esta LTS identifica puntos débiles, como la falta de un objetivo neto cero y la necesidad de acciones de mitigación y adaptación más específicas (Climate Action Tracker, 2022b).

Nuestro análisis complementa el LTS de México aportando ideas sobre cómo combinar las transformaciones en toda la economía para lograr la neutralidad de carbono. La figura 5.12 muestra las emisiones en México bajo cada categoría de transformaciones. En la medida en que el Desarrollo tradicional refleja el BAU de la NDC de México, todas las categorías individuales de transformaciones alcanzarían los objetivos de reducción de emisiones del 35% expresados en la NDC. Sin embargo, ninguna categoría individual alcanza por sí sola las emisiones netas cero para 2050. Si México decidiera alcanzar las emisiones netas cero para 2050, probablemente se necesitaría un enfoque más exhaustivo más cercano a Todas las acciones.

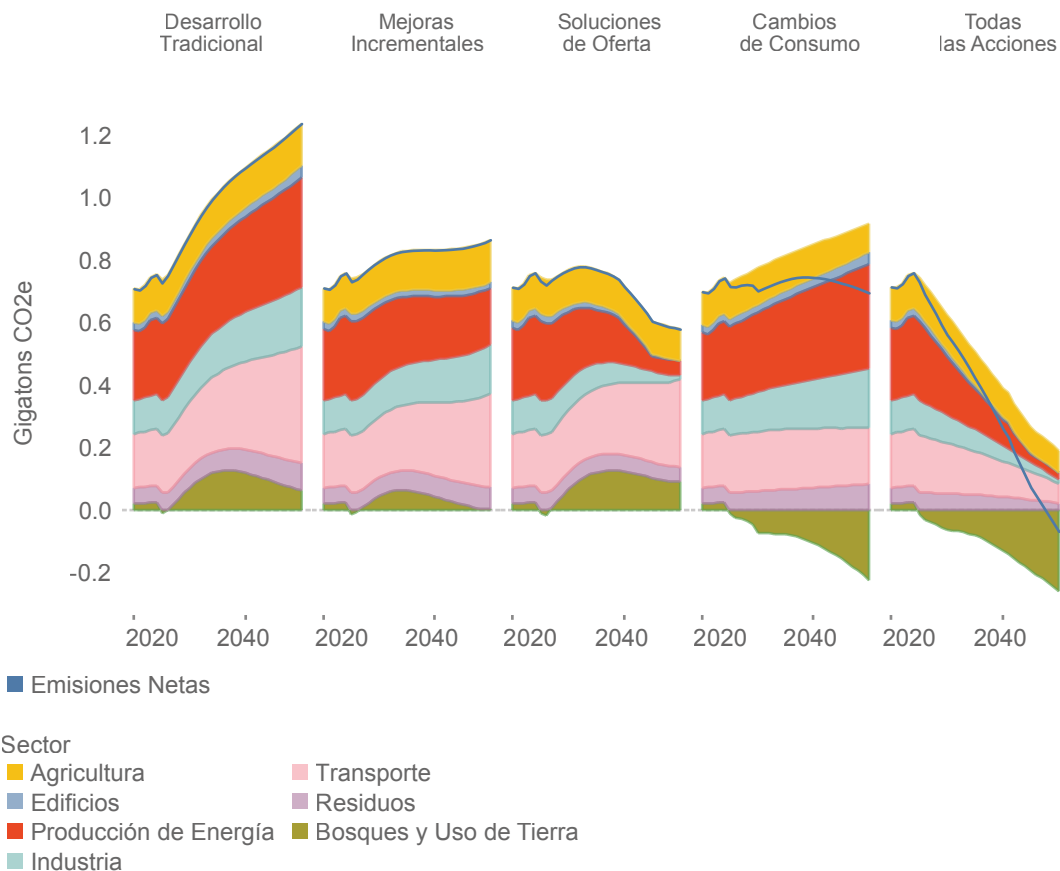


Figura 5.12 Emisiones bajo aplicación máxima de transformaciones por categoría, México.

La figura 5.13 muestra que todas las categorías de transformaciones generan beneficios netos positivos bajo supuestos nominales sobre incertidumbres. Los beneficios más significativos se generan en el ahorro de costos de combustible y en los beneficios para la salud, la seguridad y la productividad. Hacer posibles las transformaciones en Todas las acciones requiere inversiones sectoriales del orden de 272,000 millones de dólares entre 2025 y 2050 (aproximadamente el 1% del PIB actual al año) y produce unos beneficios netos de 659,000 millones de dólares.

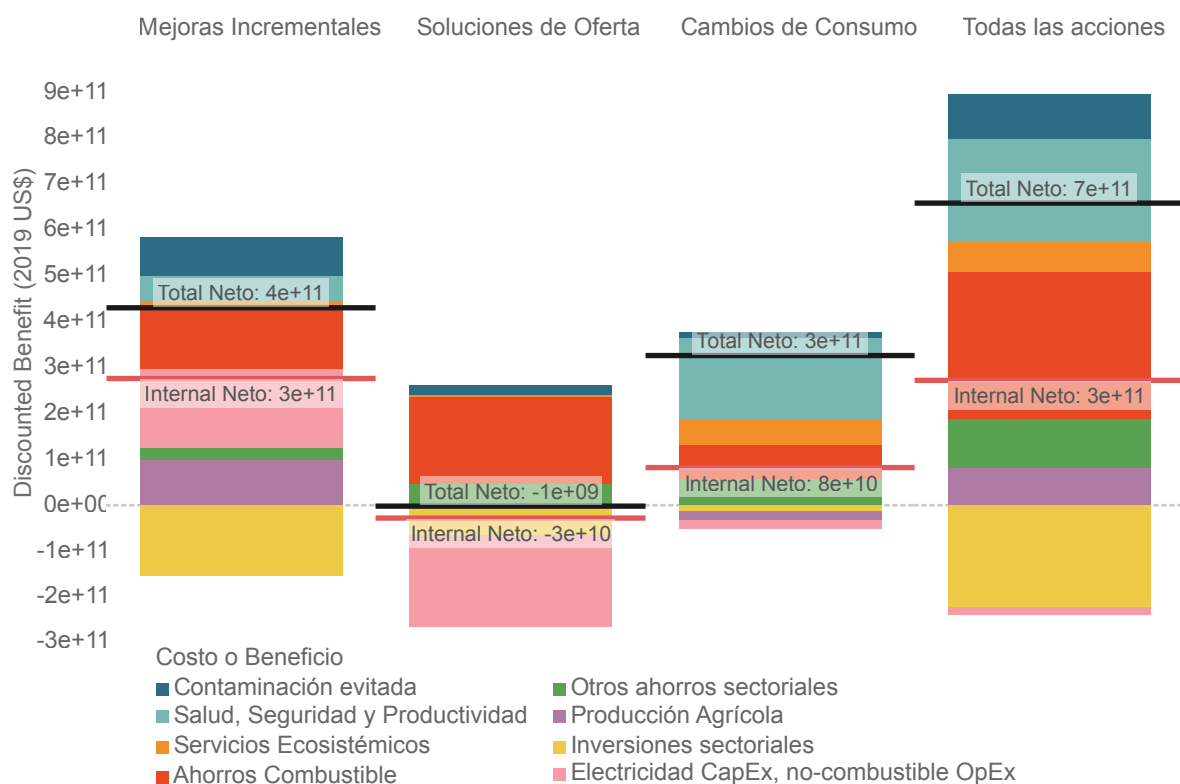


Figura 5.13 Costos y beneficios descontados en caso de aplicación máxima de las transformaciones por categorías, México.

Las figuras 5.14 y 5.15 presentan los resultados bajo incertidumbre para México y proporcionan versiones a nivel de país de nuestro análisis del capítulo 4. La Figura 5.14 muestra las emisiones a lo largo del tiempo y bajo incertidumbre de 1,000 variantes de la estrategia de Acciones Críticas descrita en el Capítulo 4. Al contrario de lo que ocurre en Brasil o en el conjunto de la región, apenas encontramos estrategias que alcancen robustamente emisiones netas negativas.

Fijamos un umbral de 250 MtCO₂e para 2050 (por debajo de las más de 1,200 MtCO₂e de la trayectoria de Desarrollo tradicional) para identificar las estrategias que reducen más las emisiones. Aproximadamente el 60% de estas variantes reducen las emisiones por debajo del umbral, mientras que el 40% de las trayectorias lo superan. La figura 5.15 muestra que la aplicación de las cuatro acciones críticas produce beneficios netos en la preponderancia de las variantes y condiciones que examinamos.

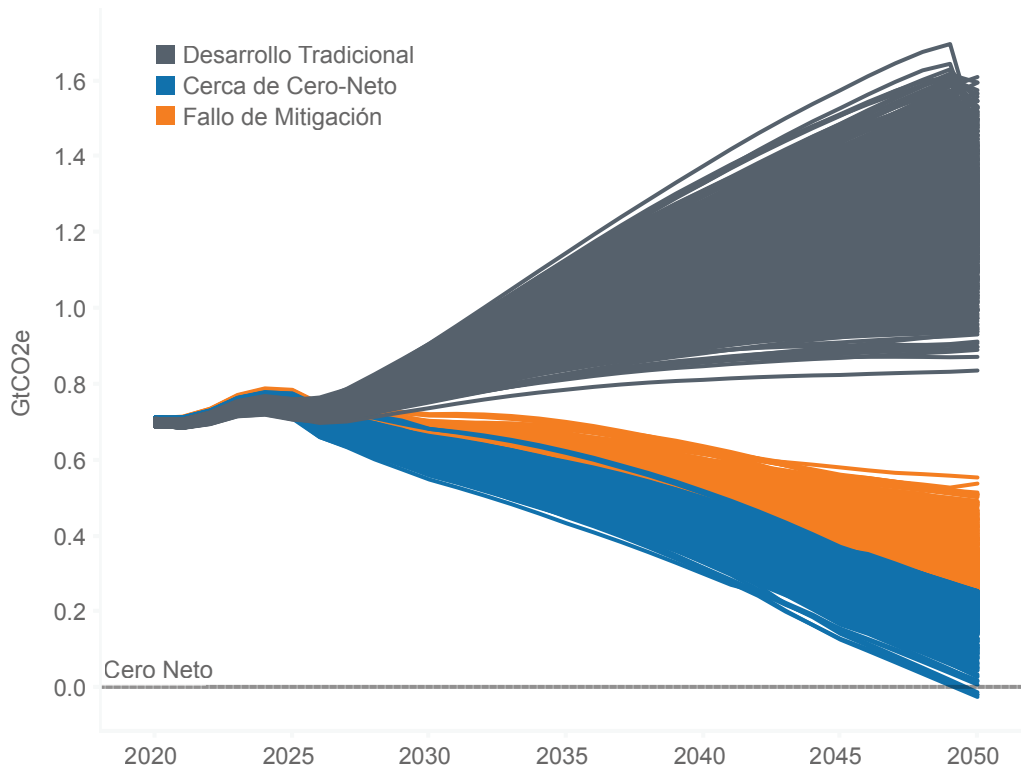


Figura 5.14 Trayectorias de las emisiones totales de gases de efecto invernadero bajo incertidumbre a través de las estrategias, México.

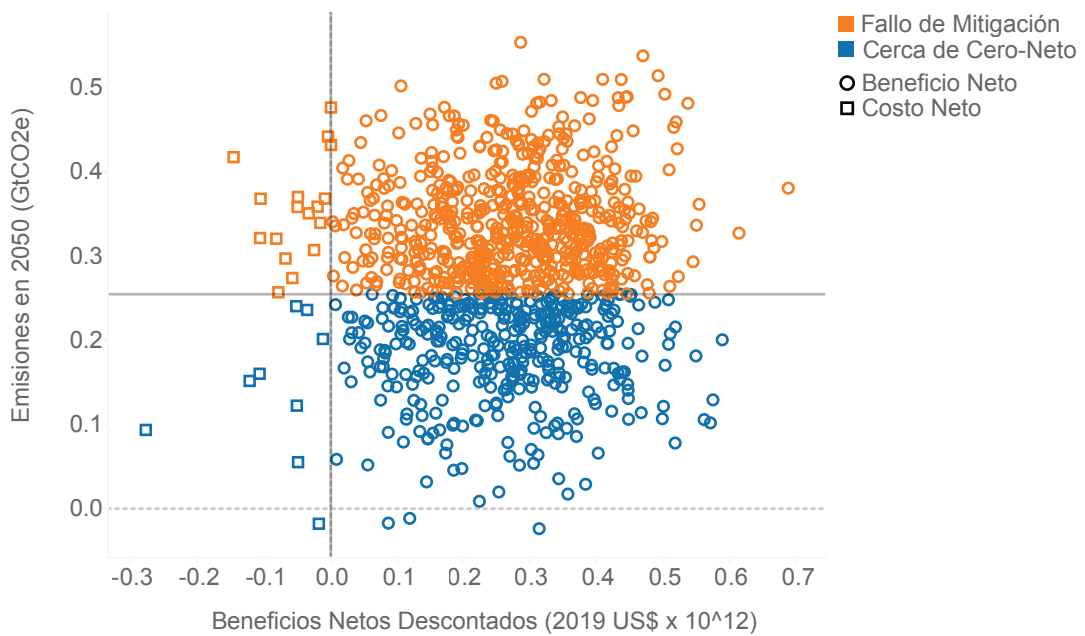


Figura 5.15 Beneficios netos y emisiones netas en 2050 de las variantes de Acción Crítica bajo incertidumbre, México.

La figura 5.16 identifica las combinaciones de condiciones que llevan a las Acciones Críticas a incumplir los objetivos de cero emisiones netas en México. Aquí surge un conjunto de condiciones vulnerables diferente al de la región o al de otros países. Para México, la reducción del cambio medio en las tasas de secuestro de los bosques secundarios (eje horizontal) es una amenaza clave para alcanzar el objetivo neto cero, aunque la señal es ruidosa. El empeoramiento de las tasas requiere una mayor intensidad de transformaciones clave específicas: los cambios en la producción y el consumo de alimentos, las transiciones hacia las energías renovables y la electrificación del transporte son factores determinantes para alcanzar bajas emisiones.

La figura 5.16 destaca una región en la esquina inferior izquierda en la que incluso unas tasas de secuestro superiores a las nominales pueden amenazar los objetivos de reducción profunda si estas transformaciones se aplican a baja intensidad. Aquí, el 95% de las trayectorias en esta región no alcanzan el umbral de emisiones, y el 53% del total de trayectorias que no lo alcanzan se encuentran en esta región.

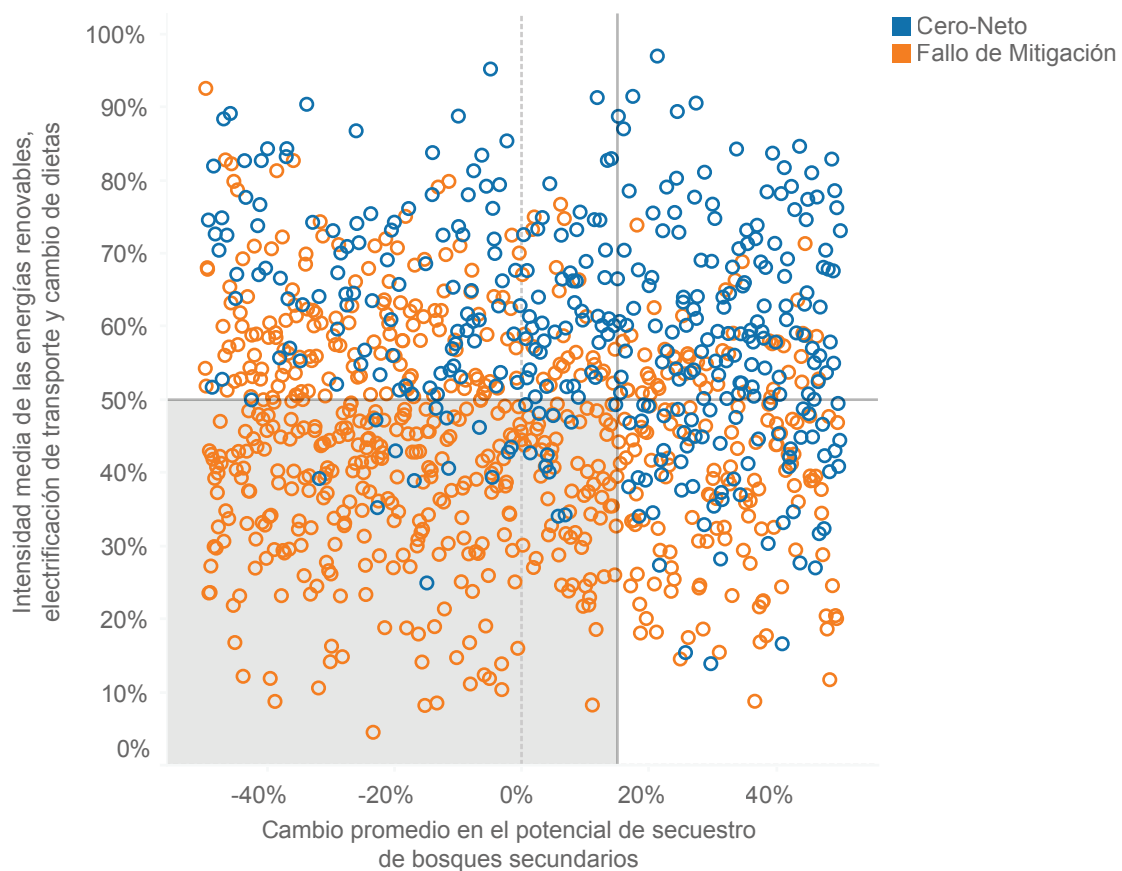


Figura 5.16 Condiciones vulnerables de las acciones críticas, México.

Costos y beneficios de lograr
la carbono-neutralidad en
América Latina y el Caribe

6

CAPÍTULO

Discusión y conclusiones

En este estudio, analizamos las opciones para que América Latina y el Caribe alcancen con solidez dos objetivos de desarrollo: lograr cero emisiones netas en consonancia con los objetivos del Acuerdo de París y proporcionar beneficios sociales, económicos y medioambientales netos a su población. En este capítulo, revisamos nuestros hallazgos y discutimos las barreras que deber ser superadas para alcanzar esos objetivos, y cómo este estudio puede informar los planes de descarbonización a nivel de país para lograrlo. Concluimos con una revisión de las limitaciones que apuntan a los próximos pasos.

Principales resultados regionales

Constatamos que alcanzar la carbono-neutralidad en 2050 a nivel regional es técnicamente factible y puede conferir enormes beneficios de hasta 2,7 billones de dólares a la región, bajo supuestos nominales y una estrategia que adopte todas las acciones de descarbonización disponibles, en comparación con un desarrollo que siga los patrones históricos.

Sin embargo, hacerlo todo en todas partes de una vez no es factible ni necesario. Las particularidades locales significan que cada país dispuesto a tomar este camino tendría que desarrollar su propia estrategia, basada en sus prioridades y su capacidad. La incertidumbre que rodea a cualquier plan para 2050 significa que las LTS y las NDC tendrán que actualizarse periódicamente, basándose en consultas con las partes interesadas y teniendo en cuenta los últimos datos y evidencia científica disponible.

A pesar de estas advertencias, nuestro análisis de miles posibles configuraciones de una estrategia de descarbonización sugiere que cualquier camino regional sólido hacia el cero neto requiere aplicar de forma significativa al menos cuatro acciones clave:

1. acabar con la deforestación;
2. moderando el aumento, o incluso disminuyendo, la producción de carne de vacuno;
3. cambiar el combustible del transporte hacia la electricidad y el hidrógeno; y
4. producir electricidad e hidrógeno con energías renovables.

Acabar con la deforestación es fundamental para poner fin a la conversión del uso de la tierra, una enorme fuente de emisiones regionales. Hacerlo puede transformar los bosques de la región de una fuente neta de emisiones a un sumidero neto. Sin embargo, el sumidero debe ser lo suficientemente grande como para compensar las emisiones residuales del resto de la economía. Para ello, es necesaria la forestación, que se produce desplazando la producción alimentaria de los alimentos intensivos en tierra, en particular la carne roja, hacia otros alimentos.

El transporte es una de las fuentes de emisiones de más rápido crecimiento en la región, dada la creciente demanda de desplazamientos en vehículos privados. Nuestro análisis señala como clave el cambio de combustible en el transporte, ya que reduce las emisiones incluso si los cambios de modo y actividad estuvieran limitados. Los cambios de combustible en el transporte y en cualquier otro sector reducen las emisiones sólo en la medida en que la electricidad y el hidrógeno -los principales combustibles de sustitución- se produzcan con energías renovables y no con combustibles fósiles. Así pues, la limpieza de la red y la producción de hidrógeno verde son la cuarta acción crítica en una estrategia de descarbonización a escala regional. Un estudio reciente de la AIE sugiere que el mundo está pivotando hacia los vehículos eléctricos y las energías renovables, y la cuestión clave ahora es si estos cambios irán lo suficientemente rápido y lejos en los próximos años.

Para alcanzar el cero neto, estas cuatro acciones deben ir acompañadas de otros cambios en toda la economía, como el aumento de la eficiencia energética de los edificios, el cambio a las bombas de calor y al transporte público, el uso más eficiente de los materiales y la destrucción de los gases fluorados potentes. Cada una de estas transformaciones tiene un impacto modesto pero importante en las emisiones regionales y puede ser más o menos crítica para reducir las emisiones o desbloquear los beneficios socioeconómicos en los distintos países.

Una estrategia regional con estas características sigue siendo vulnerable a no alcanzar la carbono-neutralidad cuando la superficie forestal necesaria para compensar las emisiones residuales es inferior a la disponible. Esto puede ocurrir en un futuro con una baja productividad ganadera y menores tasas de secuestro forestal. Una menor productividad ganadera aumenta la superficie necesaria para la cría de ganado, incrementando así las presiones para deforestar. Un secuestro reducido significa que hay que proteger aún más bosques existentes y que hay que devolver más pastos y cultivos forrajeros a los bosques secundarios. Para protegerse de estos riesgos es necesario intensificar los esfuerzos para acabar con la deforestación y reducir la producción ganadera.

Es importante destacar que el cambio climático exacerba estos factores de estrés. Aparte del impacto negativo de la deforestación inducida por el hombre, diversos estudios muestran que las estaciones secas más intensas ya están sometiendo a estrés a los ecosistemas amazónicos y pueden limitar su capacidad para almacenar carbono (Gatti et al. 2021). El aumento del estrés térmico, la disminución de la disponibilidad de agua, los patógenos y la menor disponibilidad de alimentos son algunos de los muchos factores potenciales de estrés que el cambio climático ejerce sobre la productividad ganadera (Rojas-Downing et al., 2017). Sin embargo, la productividad ganadera es tanto un factor de estrés exógeno como una acción endógena. Muchas de las técnicas que utilizan actualmente los ganaderos de la región no son de última generación, por lo que el cambio a nuevas prácticas agrícolas que generen mayores rendimientos puede producir más alimentos en menos tierra. También hay altas tasas de pérdidas de alimentos en la cadena de suministro y de desperdicio de alimentos a nivel de minoristas y consumidores, y reducir esas pérdidas y desperdicios reduciría la cantidad que es necesario producir en el campo en primer lugar. Colectivamente, estas acciones reducen la necesidad de más tierra y preservan el valor de los servicios de los ecosistemas forestales como co-beneficio (Searchinger et al., 2019; Dumas et al, 2022), al tiempo que satisfacen mejor las necesidades dietéticas y sanitarias de la población.

Por último, una descarbonización robusta puede conferir beneficios netos de hasta 2 billones de dólares a la región (descontados al 7%), y que el beneficio neto tiene una mediana de 1 billón de dólares en todas las condiciones profundamente inciertas que exploramos. Estos beneficios son netos de inversiones técnicas sustanciales, que oscilan entre 0,5 y 1,5 billones de dólares dependiendo del futuro. Los mayores beneficios consistentes son en forma de ahorro de costos de combustible; beneficios para la salud, la productividad y la seguridad; y servicios ecosistémicos.

Obstáculos al cambio

Nuestro análisis sugiere que América Latina y el Caribe pueden hacer la transición a una economía neta cero mientras disfrutan de un mejor desarrollo, con enormes beneficios para los resultados sociales, económicos y medioambientales. Ante esto, es lógico preguntarse por qué estas transformaciones no se están produciendo al ritmo que estos resultados podrían justificar.

Una serie de barreras normativas, fiscales, informativas y de otro tipo se interponen en el camino de los cambios que conducirían a un mejor desarrollo (Fazekas et al., 2022). Por ejemplo, las subvenciones generalizadas asociadas a los combustibles fósiles (Fondo Monetario Internacional, 2021) perpetúan el uso de combustibles fósiles en el transporte y la producción de energía, incluso cuando las energías renovables son la alternativa más rentable. La escasa supervisión y aplicación por parte de los gobiernos de las leyes y normativas vigentes puede debilitar las protecciones ya existentes para los bosques y crear acaparamientos de tierras que aceleren la deforestación, obteniendo beneficios a corto plazo a expensas de la sostenibilidad a largo plazo (Carrero et al., 2022). Incluso el entorno construido puede plantear barreras al cambio: la expansión urbana propiciada por el énfasis histórico en los desplazamientos por carretera y la ausencia de carriles para bicicletas y caminos para peatones puede dificultar el cambio del desarrollo hacia los desplazamientos a pie, en bicicleta, en transporte público y otros modos sostenibles (Mouratidis et al., 2019).

El reto se ve agravado por el hecho de que los costos y beneficios de las transformaciones afectan de forma diferente a diversas personas o actores, y muchos de los mayores costos se internalizan mientras que muchos de los beneficios permanecen externos a las fuerzas del mercado. Como ejemplo, un cambio en la producción y el consumo de alimentos del ganado a los cultivos, con las consiguientes mejoras dietéticas, podría ofrecer beneficios masivos y generalizados en términos de productividad, beneficios nutricionales y ahorro de costos sanitarios, y potencialmente ahorro de comestibles (Springmann et al., 2016). Sin embargo, supondría un costo para el sector ganadero en términos de producción sacrificada, lo que puede generar la resistencia de poderosas industrias (Merrigan et al., 2015) y poner en entredicho los esfuerzos de reducción de la pobreza en las zonas rurales. Mientras tanto, los beneficios de una dieta más sana redundan a largo plazo en los hogares y en el sistema sanitario. Otro ejemplo: los costos de ampliar los servicios de transporte recaen generalmente en las autoridades de transporte público, que se enfrentan a una serie de limitaciones presupuestarias y normativas. Los beneficios del transporte público, por el contrario, los cosechan no sólo los usuarios del tránsito, sino la población en general que puede beneficiarse de una mayor movilidad, una menor congestión, unas carreteras más seguras y un aire más limpio. En resumen, los costos suelen ser distintos y percibidos agudamente por determinados grupos, mientras que los beneficios son difusos, difíciles de medir y ampliamente experimentados por un grupo mucho mayor.

La ejecución es también relevante. Aunque una transición a cero emisiones netas se aleja progresivamente, en términos de emisiones, de una tendencia de desarrollo tradicional, el cambio de rumbo suele requerir grandes inversiones iniciales impulsadas por una visión a largo plazo (Vogt-Schilb et al., 2018). Para algunas transformaciones, los países pueden depender del capital internacional. Muchos gobiernos de la región, por ejemplo, han diseñado mercados de generación de energía y transporte público que permiten a las empresas extranjeras invertir en paneles solares, molinos de viento o autobuses eléctricos con un coste inicial nulo o escaso para los países, siendo financiados en cambio con el tiempo por los contribuyentes. Nuestra investigación no estudia la viabilidad a gran escala de estos programas, ni su impacto económico.

Desarrollo de planes de descarbonización a largo plazo para cada país

Nuestra investigación demuestra que América Latina y el Caribe pueden alcanzar la

carbono-neutralidad en 2050 con un beneficio neto, y que cuatro acciones clave forman la columna vertebral de las estrategias de descarbonización. Sin embargo, nuestro trabajo también muestra que una solución no sirve para todos. Los países difieren en muchos aspectos lo que determina hasta qué punto las acciones importantes a nivel regional tienen sentido a nivel nacional.

Cada país tendrá que construir su propia visión de un futuro con bajas emisiones, hacer sus propios planes sobre cómo alcanzar ese objetivo y diagnosticar las barreras que impiden a sus países capitalizar un futuro con una población más sana, un medio ambiente más saludable y una economía más fuerte. Como una imagen que se va enfocando, las implicaciones de la descarbonización en términos de costos y beneficios también se irán aclarando a nivel nacional. Por ejemplo, mientras que la estrategia regional para descarbonizar el transporte se apoya en gran medida en el cambio de combustible, un país con una alta densidad urbana y un entorno en el que se puede caminar podría considerar que cambiar de modo de transporte y reducir la demanda de transporte es una alternativa más barata y beneficiosa.

Los países se enfrentan a una serie de retos comunes en la planificación de la descarbonización (Calfucoy et al., 2022). Su planificación exitosa de la descarbonización a largo plazo comparte algunas características (Climate Action Tracker, 2019; BID, 2019; Banco Mundial, 2023; Jaramillo et al., 2023):

- Los planes deben integrar y abordar conjuntamente los objetivos de descarbonización y desarrollo.
- Todas las partes interesadas del gobierno y del sector privado deben ser consultadas para enmarcar esos objetivos y para articular las acciones, las limitaciones y las incertidumbres y proporcionar aportaciones en forma de datos, modelos y herramientas analíticas.
- Las acciones deben describirse en términos que sean significativos y procesables para quienes deben aplicarlas.
- Las acciones deben evaluarse en función no sólo de sus efectos sobre las emisiones, sino también de sus efectos macroeconómicos, incluidos los costos y beneficios para los agentes del sector y para la sociedad en general.
- Las evaluaciones deben incluir todos los sectores y todos los gases de efecto invernadero y realizar valoraciones transparentes y con base científica sobre cómo se reducirán.
- La planificación debe hacer explícita la incertidumbre, identificar cómo los planes pueden ser vulnerables a los supuestos o a las condiciones cambiantes, e identificar las acciones para hacerlos más sólidos.

Nuestro enfoque en este estudio facilita la planificación y los procesos de descarbonización con estas características. Como describe el capítulo 2, SiSePuede es un conjunto de herramientas para desarrollar y evaluar estrategias de descarbonización, y está integrado en una metodología de toma de decisiones robusta, que proporciona un proceso interactivo de participación de las partes interesadas, un enfoque para desarrollar grandes conjuntos de futuros que tengan en cuenta la incertidumbre, y técnicas para analizar cientos de escenarios con el fin de identificar y mitigar las vulnerabilidades clave de las diferentes estrategias.

SiSePuede puede ejecutarse para cualquier país o región del mundo. Integra y se calibra a partir de conjuntos de datos mundiales disponibles públicamente de la AIE, el FMI, la FAO, el Banco Mundial, la OCDE, el BID y otros.

Cuando faltan datos o son erróneos, SiSePuede imputa puntos de datos basándose en información de países similares en tamaño, geografía, nivel de desarrollo, clima y otros factores relevantes. Además, SiSePuede es de código abierto, escalable, no está patentado y está a disposición del público.

Los análisis iniciales a nivel de país, como los que se muestran en este estudio, pueden generarse rápidamente y utilizarse como punto de partida concreto para los debates sobre las LTS con todo el conjunto de partes interesadas, desde los actores gubernamentales sectoriales y transversales hasta el sector privado. Pueden recomendar transformaciones, incertidumbres y métricas diseñadas para las condiciones, objetivos y limitaciones del país. A continuación, los análisis pueden adaptarse e iterarse con los datos y modelos específicos de cada país que posean las agencias nacionales, los académicos y otros.

La participación activa durante la fase de formulación del LTS de aquellos que tendrán que aplicar el cambio es esencial para informar el análisis y aumentar el apoyo de los responsables de ejecución de la política climática (Niet et al., 2021). Al implicarse en una fase temprana del proceso, sus opiniones, experiencia y preocupaciones pueden dar forma al plan y facilitar su ejecución. SiSePuede y RDM proporcionan conjuntamente un proceso y herramientas flexibles para garantizar que las prioridades y los puntos de vista de las partes interesadas se integren en el análisis, aumentando la apropiación nacional de los planes resultantes.

Próximos pasos

Este estudio tiene varias limitaciones que también señalan el camino a seguir. Nuestro análisis se centra principalmente en las principales acciones de descarbonización. Sin embargo, varias innovaciones prometedoras merecen ser incluidas en futuros análisis, como la producción de acero con cero emisiones con hierro de reducción directa a base de hidrógeno (Wang et al., 2021) o el uso de la propulsión eólica para operaciones marítimas a gran escala (Chou et al., 2021).

También hay preguntas importantes que responder en relación con la equidad, el empleo y la justicia medioambiental. Aunque muchas investigaciones demuestran que las acciones para reducir las emisiones en América Latina y el Caribe también podrían crear empleo, el flujo de creación y pérdida de puestos de trabajo en diferentes sectores es una métrica importante para evaluar los impactos distributivos de una estrategia de descarbonización y para facilitar el apoyo y el éxito del plan (Saget et al., 2020; Feng et al., 2023; Alfonso et al., 2023).

Aunque nuestro estudio responde a muchas preguntas sobre las estrategias de descarbonización para América Latina y el Caribe, también plantea otras nuevas. Una financiación climática inteligente será importante para posibilitar los numerosos cambios técnicos necesarios, incluso cuando esos cambios supongan ahorros a largo plazo. Un uso futuro de SiSePuede es examinar los efectos de la descarbonización en los gastos e ingresos fiscales: ¿Con qué rapidez reducirá el ahorro energético las subvenciones a los combustibles fósiles? ¿Qué podría sustituir a los impuestos sobre la gasolina y el gasóleo una vez que los parques automovilísticos se vuelvan eléctricos? ¿Qué actividades económicas disminuirán y qué podría sustituirlas? ¿Cómo se reflejará la reducción de los costos sanitarios en un aumento de la productividad, la actividad económica y los impuestos sobre los beneficios? SiSePuede puede ayudar a arrojar luz sobre estas preguntas, que sin duda serán importantes para los ministerios de finanzas cuando sus países emprendan el camino hacia la descarbonización.

Referencias

- AFD (French Agency of Development) 2050 Facility. 2023. “Transitioning to Low-Carbon and Resilient Development by 2050: The 2050 Facility.” The French Agency of Development. <https://www.afd.fr/en/2050-facility>
- Alfonso, M., Bagolle, A., Baptista, D., Bos, M.S., Fazekas, A., Schwartz, L., Vogt-Schilb, A., and Urquidi, M., 2023. Advancing a Just Transition in Latin America and the Caribbean. Inter-American Development Bank.
- American Automobile Association (AAA). 2019. “Your driving costs: How much are you really paying to drive?” <https://exchange.aaa.com/wp-content/uploads/2019/09/AAA-Your-Driving-Costs-2019.pdf>
- Arguello, R., Delgado, R., Espinosa, M., Gonzalez, T., and Sandoval, J.M., 2022. Cost-Benefit Analysis of Options to Achieve Net-Zero Emissions in Colombia. Inter-American Development Bank.
- Armenteras, D., Espelta, J.M., Rodríguez, N., and Retana, J. 2017. “Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010).” *Global Environmental Change* 46: 139-147.
- Arndt, C., Hristov, A.N., Price, W.J., McClelland, S.C. Pelaez, A.M., Cueva, S.F., Oh, J. et al. 2022. “Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 C target by 2030 but not 2050.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119(20): e2111294119.
- Audoly, R., Vogt-Schilb, A., Guivarch, C., and Pfeiffer, A. 2018. Pathways toward zero-carbon electricity required for climate stabilization. *Applied Energy* 225: 884–901. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.026>
- Bagolle, A., Costella, C., and Goyeneche, L. 2023. Social Protection and Climate Change: How Can We Protect the most Vulnerable Households Against New Climate Threats? Inter-American Development Bank.
- Bastianoni, S., Pulselli, F.M., and Tiezzi, E. 2004. “The problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions.” *Ecological Economics* 49(3): 253-257.
- Bataille, C., Waisman, H., Vogt-Schilb, A., Jaramillo, M., Delgado, R., Arguello, R., Clarke, L., Wild, T., Lallana, F., Bravo, G., LeTreut, G., Nadal, G., Godinez, G., Quiros-Tortos, J., Pereira, E., Howells, M., Buira, D., Tovilla, J., Farbes, J., et al. 2020. Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities. *Energy Strategy Reviews* 30: 100510.
- Beauchemin, K.A., Ungerfeld, E.M., Eckard, R.J., and Wang, M. 2020. “Fifty years of research on rumen methanogenesis: Lessons learned and future challenges for mitigation.” *Animal* 14(S1): s2-s16.
- Benavides, C., Cifuentes, L., Díaz, M., Gilabert, H., Gonzales, L., González, D., Groves, D. et al. 2021. “Options to achieve carbon neutrality in Chile: An assessment under uncertainty.”

Inter-American Development Bank.

- Bezerra, P., da Silva, F., Cruz, T., Mistry, M., Vasquez-Arroyo, E., Magalar, L., et al. 2021. “Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households.” *Energy and Buildings* 234: 110696.
- Binsted, M., Iyer, G., Edmonds, J., Vogt-Schilb, A., Arguello, R., Cadena, A., Delgado, R., Feijoo, F., Lucena, A.F., McJeon, H. and Miralles-Wilhelm, F. 2020. Stranded asset implications of the Paris Agreement in Latin America and the Caribbean. *Environmental Research Letters* 15(4): 044026.
- Burke, A., Miller, M., Sinha, A., and Fulton, L. 2022. Evaluation of the Economics of Battery-Electric and Fuel Cell Trucks and Buses: Methods, Issues, and Results. UC Davis Research Report.
- Cardil, A., De-Miguel, S., Silva, C. A., Reich, P. B., Calkin, D., Brancalion, P. H., et al. 2020. “Recent deforestation drove the spike in Amazonian fires.” *Environmental Research Letters* 15(12): 121003.
- Calatayud, A., González, S.S., Bedoya-Maya, F., Giraldez Zúñiga, F., and Márquez, J.M. 2021. “Urban Road Congestion in Latin America and the Caribbean: Characteristics, Costs, and Mitigation.” *Inter-American Development Bank Monograph*: 902.
- Calfucoy, P., Torres Gunfaus, M., Fazekas, A. and Vogt-Schilb, A. 2022. “Long-Term Strategies for Decarbonization in Latin America: Learnings from Actor-Based Insights into the Drafting Process.” *Inter-American Development Bank Working Paper Series* :1361.
- Cárdenas, M., and Orozco, S. 2022. “The challenges of climate mitigation in Latin America and the Caribbean: Some proposals for action.” *UNDP Latin America and the Caribbean Policy Document Series*.
- Carrero, G.C., Walker, R.T., Simmons, C.Z., and Fearnside, P.M. 2022. “Land grabbing in the Brazilian Amazon: Stealing public land with government approval.” *Land Use Policy* 120: 106133.
- Chen, S., Kuhn, M., Prettnner, K., and Bloom, D.E. 2019. “The global macroeconomic burden of road injuries: estimates and projections for 166 countries.” *The Lancet Planetary Health* 3(9): e390-e398.
- Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., and Renken, K. 2021. “A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology.” *Sustainability* 13(4): 1880.
- Climate Action Tracker. 2019. Evaluation Methodology for National Net Zero Targets. https://climateactiontracker.org/documents/859/CAT_Evaluation-methodology-for-national-net-zero-targets.pdf
- Climate Action Tracker. 2022a. Brazil: Country Summary (last updated September 5, 2022;

- accessed July 4, 2023).
- Climate Action Tracker. 2022b. Mexico: Country Summary (last updated December 12, 2022; accessed July 14, 2023).
- Climate Action Tracker. 2022c. 2100 Warming Projections: Emissions and expected warming based on pledges and current policies. November 2022. Available at: <https://climateaction-tracker.org/global/temperatures/>
- Climate Policy Database. 2019a. Dominican Republic: Country Summary (accessed July 14, 2023).
- Climate Watch Data. 2020a. Dominican Republic: Emission Drivers (accessed July 14, 2023).
- Climate Watch LTS Explorer. 2020. Explore Long-Term Strategies (accessed September 11, 2023). Washington, DC: World Resources Institute.
- Climate Watch Historical GHG Emissions. 2022. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>
- Climate Watch Data. 2023. Net Zero Tracker (accessed October 17, 2023). <https://www.climatewatchdata.org/net-zero-tracker?locations=LAC>
- Commoner, B. 2013. "The environmental cost of economic growth." *Energy, Economic Growth and the Environment*. RFF Press, pp. 30-65.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S., and Turner, R.K. 2014. "Changes in the global value of ecosystem services." *Global Environmental Change* 26: 152-158.
- Dargay, J., Gately, D., and Sommer, M. 2007. "Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030." *The Energy Journal* 28(4).
- Davis, S.J., and Caldeira, K. 2010. "Consumption-based accounting of CO2 emissions." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(12): 5687-5692.
- de Foy, B., Schauer, J.J., Lorente, A., and Borsdorff, T. "Investigating high methane emissions from urban areas detected by TROPOMI and their association with untreated wastewater." *Environmental Research Letters* 18(4): 044004.
- de Municipios, F. D., and International City/County Management Association. *Resilient Land Use and Development Planning for Dominican Republic Municipalities: A Resource Notebook for Integrating Climate Change Considerations*. <https://bvearmb.do/bitstream/handle/123456789/1257/PA00T1D5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Delgado, R., Eguino, H., and Lopes Pereira, A. 2021. "Fiscal policy and climate change: Recent experiences of finance ministries in Latin America and the Caribbean." *Inter-American Development Bank*. <http://dx.doi.org/10.18235/0003376>
- Di Gregorio, M., Fatorelli, L., Pramova, E., May, P., Locatelli, B., and Brockhaus, M. *Integrat-*

- ing Mitigation and Adaptation in Climate and Land Use Policies in Brazil: A Policy Document Analysis. Report. University of Leeds and CIFOR , Leeds, UK and Bogor, Indonesia.
- Dumas, P., Stefan W., Searchinger, T., Andrieu, N., and Vogt-Schilb, A. 2022. “Options to achieve net-zero emissions from agriculture and land use changes in Latin America and the Caribbean.” Working paper 1377. Inter-American Development Bank.
- ECLAC Statistical Briefings. 2021. “Forest loss in Latin America and the Caribbean from 1990 to 2020: The statistical evidence.” July 2021.
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. 2006. “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.” Japan.
- Emmerling, J., Drouet, L., van der Wijst, K.-I., Van Vuuren, D., Bosetti, V., and Tavoni, M. 2019. “The role of the discount rate for emission pathways and negative emissions.” *Environmental Research Letters* 14(10): 104008.
- EPA. 2019. Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emission Projections & Marginal Abatement Cost Analysis: Methodology Documentation. EPA-430-R-19-012. September 2019.
- Escudero, M., and Mendoza, E. 2021. “Community perception and adaptation to climate change in coastal areas of Mexico.” *Water* 13(18): 2483.
- Fawcett, D., Sitch, S., Ciais, P., Wigneron, J. P., Silva-Junior, C. H. L., Heinrich, V., Vancutsem, C., Achard, F., Bastos, A., Yang, H., Li, X., Albergel, C., Friedlingstein, P., & Aragão, L.E.O.C. 2023. Declining Amazon biomass due to deforestation and subsequent degradation losses exceeding gains. *Global Change Biology*, 29: 1106-1118.
- Fay, M., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Rozenberg, J., Narloch, U., and Kerr, T. 2015. *Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future*. World Bank.
- FAO. FAOSTAT. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Accessed on September 29, 2023. Extracted from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2023. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, Agrifood Systems Transformation and Healthy Diets Across the Rural–Urban continuum*. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cc3017en>
- Fazekas, A., Bataille, C., and Vogt-Schilb, A. 2022. *Achieving Net-Zero Prosperity: How Governments Can Unlock 15 Essential Transformations*. Inter-American Development Bank.
- Feng, K., Song, K., Viteri, A., Liu, Y., and Vogt-Schilb, A. 2023. “National and local labor impacts of coal phase-out scenarios in Chile.” *Journal of Cleaner Production* 414: 137399.
- FIRJAN. 2015. “O Custo dos Deslocamentos nas Principais Áreas Urbanas do Brasil.”
- Gallo, Patricia, and Eike Albrecht. 2019. “Brazil and the Paris Agreement: REDD+ as an instrument of Brazil’s Nationally Determined Contribution compliance.” *International*

- Environmental Agreements: Politics, Law and Economics 19: 123-144.
- Gatti, L.V., Basso, L.S., Miller, J.B., Gloor, M., Domingues, L.G., Cassol, H.L.G., Tejada, G., et al. 2021. "Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change." *Nature* 595(7867): 388-393.
- GEF (Global Environment Facility). 2023. "Net-Zero Nature-Positive Accelerator Integrated Programme." The Global Environment Facility. <https://www.thegef.org/projects-operations/projects/11085>
- Groves, D.G., and Lempert, R.J. 2007. "A new analytic method for finding policy-relevant scenarios." *Global Environmental Change* 17(1): 73-85.
- Groves, D.G., Syme, J., Molina-Perez, E., Hernandez, C.C., Víctor-Gallardo, L.F., Godinez-Zamora, G., Quirós-Tortós, J., Denegri, F.D.L., Murillo, A.M., Gómez, V.S., and Vogt-Schilb, A. 2020. *The Benefits and Costs of Decarbonizing Costa Rica's Economy: Informing the Implementation of Costa Ric's National Decarbonization Plan Under Uncertainty*. Inter-American Development Bank and RAND Corporation.
- Groves, D.G., Miro, M., Syme, J., Becerra-Ornelas, A.U., Molina-Pérez, E., Saavedra, V., Vogt-Schilb, A. 2021. *Water Infrastructure Planning for the Uncertain Future in Latin America a Cost—and Time—Efficient Approach for Making Robust Infrastructure Decisions, with a Case Study on Mendoza, Argentina*.
- Groves, D.G., Molina-Perez, E., Syme, J., Alvarado, G., Denegri, F.D.L., Román, J.D.A., and Rojas, A.J. 2022. *A Green Costa Rican COVID-19 Recovery: Aligning Costa Ric's Decarbonization Investments with Economic Recovery*. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Grummon, A.H., Lee, C.J., Robinson, T.N., Rimm, E.B. and Rose, D., 2023. Simple dietary substitutions can reduce carbon footprints and improve dietary quality across diverse segments of the US population. *Nature Food*, pp.1-12.
- Guthold, R., Stevens, G.A., Riley, L.M., and Bull, F.C. 2018. "Worldwide trends in insufficient physical activity from 2001 to 2016: a pooled analysis of 358 population-based surveys with 1·9 million participants." *The Lancet Global Health* 6(10): e1077-e1086.
- Hallegatte, S. 2016. *Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*. World Bank Publications.
- Hartinger, S.M., Yglesias-González, M., Blanco-Villafuerte, L., Palmeiro-Silva, Y.-K., Lescano, A.G., Stewart-Ibarra, A., Rojas-Rueda, D., et al. 2023. "The 2022 South America report of The Lancet Countdown on health and climate change: trust the science. Now that we know, we must act." *The Lancet Regional Health—Americas* 20.
- Hernández-Blanco, M., Costanza, R., Anderson, S., Kubiszewski, I., and Sutton, P. 2020. "Future scenarios for the value of ecosystem services in Latin America and the Caribbean to 2050." *Current Research in Environmental Sustainability* 2: 100008.

- Hof, A.F., den Elzen, M.G.J., Admiraal, A. Roelfsema, M., Gernaat, D.E.H.J., and van Vuuren, D.P. 2017. “Global and regional abatement costs of Nationally Determined Contributions (NDCs) and of enhanced action to levels well below 2 C and 1.5 C.” *Environmental Science & Policy* 71: 30-40.
- Husaini, D.C., Reneau, K., and Balam, D. 2022. “Air pollution and public health in Latin America and the Caribbean (LAC): A systematic review with meta-analysis.” *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 11(1): 122.
- Hutton, G., and Varughese, M. 2016. “The costs of meeting the 2030 sustainable development goal targets on drinking water, sanitation, and hygiene.”
- IDB and DDPLAC (Deep Decarbonization Pathways for Latin America and the Caribbean). 2019. *Getting to Net-Zero Emissions: Lessons from Latin America and the Caribbean*. Washington D.C.: Inter-American Development Bank.
- IEA, IRENA, UNSD, World Bank, WHO. 2023. *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report*. World Bank, Washington DC.
- IEA. 2020. *Outlook for biogas and Prospects for organic growth World Energy Outlook Special Report biomethane*. World Energy Outlook Special Report.
- IKI (International Climate Initiative). 2023. “International Climate Initiative.” The German International Climate Initiative. <https://www.international-climate-initiative.com/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- IPCC. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem and B. Rama (eds.). Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press. <http://doi:10.1017/9781009325844>
- IPCC. 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, and S. Federici (eds). Switzerland: IPCC.
- IPCC. 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe. (eds). Japan: IGES.
- International Energy Agency. 2023a. *Net Zero Roadmap a Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*. <https://iea.blob.core.windows.net/as->

- sets/13dab083-08c3-4dfd-a887-42a3ebe533bc/NetZeroRoadmap_AGlo-
balPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf
- International Energy Agency. 2023b. World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Energy Agency. 2021. Global Energy Review 2021 1-36.
- International Energy Agency. 2020. Outlook for Biogas and Prospects for Organic Growth World Energy Outlook Special Report Biomethane.
- International Monetary Fund. 2021. Fossil Fuel Subsidies by Country and Fuel Database. <https://www.imf.org/en/Topics/climate-change/energy-subsidies>
- IRENA. 2018. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA (2022), Renewable Power Generation Costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Iyer, G., Ledna, C., Clarke, L., et al. 2017. “Measuring progress from nationally determined contributions to mid-century strategies.” *Nature Climate Change* 7: 871–874.
- Jakob, A., Craig, J.L., and Fisher, G. 2006. “Transport cost analysis: a case study of the total costs of private and public transport in Auckland.” *Environmental Science & Policy* 9(1): 55-66.
- Jakob, M., Ward, H., and Steckel, J.C. 2021. “Sharing responsibility for trade-related emissions based on economic benefits.” *Global Environmental Change* 66: 102207.
- Jaramillo, M., and Saavedra, V. 2021. NDC Invest: Supporting Transformational Climate Policy and Finance. Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0003340>
- Jaramillo, M., Quirós-Tortós, J., Vogt-Schilb, A., Money, A., and Howells, M. 2023. Data-to-Deal (D2D): Open Data and Modelling of Long-Term Strategies to Financial Resource Mobilization—The case of Costa Rica.
- Jiménez, R., Serebrisky, T. and Mercado, J. 2014. Sizing electricity losses in transmission and distribution systems in Latin America and the Caribbean. Inter-American Development Bank.
- Johnson, T.M., Alatorre, C., Romo, Z. and Liu, F. 2009. Low-Carbon Development for Mexico. World Bank Publications.
- Kalra, N., Groves, D.G., Bonzanigo, Molina Perez, E., Ramos, C., Brandon, C., and Cabanillas, I.R. 2015. “Robust decision-making in the water sector: a strategy for implementing Lima’s long-term water resources master plan.” Working Paper 7439. October 14, 2015. World Bank Policy Research.

- Lempert, R.J., Popper, S.W., and Bankes, S.C. 2003. *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis*. Santa Monica, CA: RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1626.html
- Lempert, R.J., Popper, S.W., Groves, D.G., Kalra, N., Fischbach, J.R., Bankes, S.C., Bryant, B.P., Collins, M.T., Keller, K., Hackbarth, A., Dixon, L., LaTourrette, T., Reville, R.T., Hall, J.W., Mijere, C., and McInerney, D.J. *Making Good Decisions Without Predictions: Robust Decision Making for Planning Under Deep Uncertainty*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2013. https://www.rand.org/pubs/research_briefs/RB9701.html
- Marchau, V.A.W.J., Walker, W.E., Bloemen, P.J.T.M., and Popper, S.W. *Decision making under deep uncertainty: from theory to practice*. Springer Nature, 2019.
- Marinkovic, C., and Vogt-Schilb, A. 2023. *Is Energy Planning Consistent with Climate Goals? Assessing Future Emissions from Power Plants in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank.
- McCollum, D.L., Zhou, W., Bertram, C., de Boer, H.-S., Bosetti, V., Busch, S., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Fay, M., Fricko, O., Fujimori, S., Gidden, M., Harmsen, M., Huppmann, D., Iyer, G., Krey, V., Kriegler, E., Nicolas, C., Pachauri, S., Parkinson, S., Poblete-Cazenave, M., Rafaj, P., Rao, N., Rozenberg, J., Schmitz, A., Schoepp, W., van Vuuren, D., and Riahi, K. 2018. “Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals.” *Nature Energy* 3: 589–599.
- Missbach, L., Steckel, J.C., and Vogt-Schilb, A., 2023. “Cash transfers in the context of carbon pricing reforms in Latin America and the Caribbean.” *World Development*, 173: 106406.
- Merrigan, K., Griffin, T., Wilde, P., Robien, K., Goldberg, J., and Dietz, W. 2015. “Designing a sustainable diet.” *Science* 350(6257): 165-166.
- Molina-Perez, Edmundo. 2016. “Directed International Technological Change and Climate Policy.” RAND Corporation.
- Molina-Perez, E., Groves, D.G., Popper, S.W., Ramirez, A.I., and Crespo-Elizondo, R. 2019. *Developing a Robust Water Strategy for Monterrey, Mexico: Diversification and Adaptation for Coping with Climate, Economic, and Technological Uncertainties*. Santa Monica, CA: RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3017.html
- Molina-Perez, E., Esquivel-Flores, O.A., and Zamora-Maldonado, H. 2020. “Computational Intelligence for Studying Sustainability Challenges: Tools and Methods for Dealing with Deep Uncertainty and Complexity.” *Frontiers in Robotics and AI* 7: 111.
- Mouratidis, K., Ettema, D., and Næss, P. 2019. “Urban form, travel behavior, and travel satisfaction.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 129: 306-320.
- NDCP (Nationally Determined Contributions Partnership). 2023. “NDC Partnership Thematic Call on LT-LEDS and NDC Alignment, Update, and Enhancement.” NDC Partnership.

<https://ndcpartnership.org/country-action/ndc-partnership-thematic-call-lt-leds-and-ndc-alignment-update-and-enhancement>

- Niemeyer, J., and Vale, M.M. 2022. “Obstacles and Opportunities for Implementing a Policy-Mix for Ecosystem-Based Adaptation to Climate Change in Brazil’s Caatinga.” *Land Use Policy* 122: 106385.
- Niet, T., et al. 2021. “Developing a community of practice around an open source energy modelling tool.” *Energy Strategy Review* 35: 100650.
- Nordhaus, W.D. 2017. “Revisiting the social cost of carbon.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7): 1518-1523.
- Nordhaus, W.D. 2007. “A review of the Stern review on the economics of climate change.” *Journal of Economic Literature* 45(3): 686-702.
- OECD and FAO. 2022. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031*.
- Olaya, J. C., Dewez, R., Guerrero, P., Lefevre, B., Nalesso, M., and Zuloaga, D. 2020. “Incluir el cambio climático en el análisis hidrológico para el trazado y diseño de infraestructura de transporte: Guía metodológica e implementación en 33 puentes vehiculares en Haití.” Banco Interamericano de Desarrollo.
- Orozco, D., and Jaramillo, M. 2021. *The Centrality Of Ministers Of Finance in a Changing Climate Finance Functions of a Government*. E3G. https://www.e3g.org/wp-content/uploads/Ministers-of-finance-in-a-changing-climate_E3G-Report_2021.pdf
- Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2015. December 12, 2015, T.I.A.S. No. 16-1104.
- Parmesan, C., Morecroft, M.D., and Trisurat, Y. 2022. “Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability.” PhD dissertation, GIEC.
- Quirós-Tortós, J., Godinez, G., Ugarte, D.D.L.T., Heros, C., Lazo, J.G.L., Ruiz, E., Quispe, B., Canseco, D.D., Garro, F., Mora, J., Eguren, L., Sandoval, M., Campos, S., Salmeri, M., Baron, R., Fernández-Baca, J., Fukushima, A.S.I., Saavedra, V., and Vogt-Schilb, A. 2021. *Costos y Beneficios de la Carbono-Neutralidad en Perú: Una Evaluación Robusta*. Inter-American Development Bank.
- Raihan, A., and Tuspekova, A. 2022. “Towards Sustainability: Dynamic Nexus between Carbon Emission and Its Determining Factors in Mexico.” *Energy Nexus* 8: 100148.
- Rakes, K., Urriola-Cuevas, C., Pica-Téllez, A., Gonzales, L., Pérez, G., Sime, M., Pérez, S.B., Figueroa, V., Harris, J., Talbot-Wright, H., and Vogt-Schilb, A. 2023. *Planning Climate Action in Cities and Regions: Towards Carbon Neutral and Resilient Territories in the Face of Climate Change*. Inter-American Development Bank.
- Rani, A., Snyder, S.W., Kim, H., Lei, Z., and Pan, S.-Y. 2022. “Pathways to a net-zero-carbon

- water sector through energy-extracting wastewater technologies.” *NPJ Clean Water* 5(1): 49.
- Rissman, J. 2022. Decarbonizing Low-Temperature Industrial Heat in the U.S. October 2022.
- Riojas-Rodríguez, H., da Silva, A.S., Texcalac-Sangrador, J.L., and Moreno-Banda, G.L. 2016. “Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean: implications for climate change.” *Revista Panamericana de Salud Pública* 40: 150-159.
- Rojas-Downing, M.M., Nejadhashemi, A.P., Harrigan, T., and Woznicki, S.A. 2017. “Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation.” *Climate Risk Management* 16: 145-163.
- Ruiz-Rivera, N., and Lucatello, S. 2017. “The interplay between climate change and disaster risk reduction policy: Evidence from Mexico.” *Environmental Hazards* 16(3): 193-209.
- Saget, C., Vogt-Schilb, A., and Luu, T. 2020. Jobs in a Net-Zero Emissions Future in Latin America and the Caribbean. Washington DC and Geneva: Inter-American Development Bank and International Labour Organization.
- Salazar, L., and Muñoz, G. 2018. Food Security Sector Framework Document. Inter-American Development Bank.
- Schipper, L., and Marie-Lilliu, C. 1999. Transportation and CO2 Emissions: Flexing the Link—A Path for the World Bank. Washington DC: World Bank, Environment Department.
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., and Matthews, E. 2019. Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050. Washington, DC: World Resources Institute.
- Silvero, F., Rodrigues, F., Montelpare, S., Spacone, E., & Varum, H. 2019. “The path towards buildings’ energy efficiency in South American countries.” *Sustainable Cities and Society* 44: 646-665.
- SLOCAT. 2021. Tracking Trends in a Time of Change: The Need for Radical Action Towards Sustainable Transport Decarbonisation, Transport and Climate Change Global Status Report. Second edition. www.tcc-gsr.com
- Solano-Rodríguez, B., Pye, S., Li, P.-H., Ekins, P., Manzano, O., and Vogt-Schilb, A. 2019. Implications of climate targets on oil production and fiscal revenues in Latin America and the Caribbean. *Energy and Climate Change* 100037.
- Springmann, M., Godfray, H.C.J., Rayner, M. and Scarborough, P. 2016. “Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(15): 4146-4151.
- Springmann, M., Mason-D’Croz, D., Robinson, S., Wiebe, K., Godfray, H.C.J., Rayner, M.,

- and Scarborough, P. 2017. "Mitigation potential and global health impacts from emissions pricing of food commodities." *Nature Climate Change* 7(1): 69-74.
- Sterner, T., and Persson, U.M. 2008. "An even sterner review: Introducing relative prices into the discounting debate." *Review of Environmental Economics and Policy*.
- Talbot-Wright, H., and Vogt-Schilb, A. 2023. *Heat and High Water: Nine Pathways to Climate Resilient Development*. Inter-American Development Bank.
- Taye, F.A., Folkersen, M.V., Fleming, C.M., Buckwell, A., Mackey, B., Diwakar, K.C., Le, D., Hasan, S., and Ange, C.S. 2021. "The economic values of global forest ecosystem services: A meta-analysis." *Ecological Economics* 189: 107145.
- The 2050 Pathways Platform. 2023. "What We Do." 2050 Pathways. <https://2050pathways.org/what-we-do/>
- Thomas, A., Baptiste, A., Martyr-Koller, R., Pringle, P., and Rhiney, K. 2020. "Climate change and small island developing states." *Annual Review of Environment and Resources* 45: 1-27.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2023a. "Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its fourth session, held in Sharm el-Sheikh from 6 to 20 November 2022" [Decision 1/CMA.4]. <https://unfccc.int/decisions?f%5B0%5D=body%3A4099>
- UNFCCC. 2023b. Long-Term Strategies Portal. Accessed July 14, 2023. <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2022a. National Determined Contribution: Brazil.
- UNFCCC. 2022b. National Determined Contribution: Dominican Republic.
- Vera, F., Uribe, M.C., and Castillo, S.D. 2023. *Climate Action and the Paris Agreement: The Role of Cities in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank.
- Victor-Gallardo, L., Rodríguez-Zúñiga, M., Quirós-Tortós, J., Jaramillo, M., and Vogt-Schilb, A. 2022. *Policy Options to Mitigate the Fiscal Impact of Road Transport Decarbonization: The Case of Costa Rica*. Inter-American Development Bank.
- Vijn, S., Compart, D.P., Dutta, N., Foukis, A., Hess, M., Hristov, A.N., Kalscheur, K.F., et al. 2020. "Key considerations for the use of seaweed to reduce enteric methane emissions from cattle." *Frontiers in Veterinary Science* 7: 1135.
- Vogt-Schilb, A., Meunier, G., and Hallegatte, S. 2018. "When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment." *Journal of Environmental Economics and Management* 88: 210–233.
- Vogt-Schilb, A. 2021. "Stronger sustainable growth." E. Cavallo and A. Powell (eds.). *Oppor-*

- tunities for Stronger and Sustainable Postpandemic Growth. Inter-American Development Bank.
- Vogt-Schilb, A., Jaramillo, M., Víctor-Gallardo, L., Quirós-Tortos, J., and Rodríguez-Zúñiga, M. 2021. Policy Options to Mitigate the Fiscal Impact of Road Transport Decarbonization: The Case of Costa Rica 12119. Inter-American Development Bank.
- Vogt-Schilb, A. 2023. "Solving poverty need not cost the Earth." *Nature Sustainability* 6(2): 126-127.
- Waisman, H., Bataille, C., Winkler, H., Jotzo, F., Shukla, P., Colombier, M., Anandarajah, G., Boer, R., Cho, Y., Criqui, P., Denis-Ryan, A., Dhar, S., Fishedick, M., Gaeta, M., Gesteira, C., Haley, B., Hourcade, J.-C. J.-C., Kainuma, M., La Rovere, E. L., et al. 2019. "A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies." *Nature Climate Change* 9:261:268.
- Wang, R.R., Zhao, Y.Q., Babich, A., Senk, D., and Fan, X.Y. 2021. "Hydrogen direct reduction -(261:H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities." *Journal of Cleaner Production* 329: 129797.
- Welsby, D., Solano, B., Pye, S., and Vogt-Schilb, A. 2021. High and Dry: Stranded Natural Gas Reserves and Fiscal Revenues in Latin America and the Caribbean. Inter-American Development Bank.
- WHO. 2021. Health and Climate Change: Country Profile 2021: Dominican Republic. World Health Organization.
- Wilson, D.C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero, A., Velis, K., et al. 2015. Global Waste Management Outlook. UNEP.
- World Bank. 2022. Climate and Development: An Agenda for Action—Emerging Insights from World Bank Group 2021-22 Country Climate and Development Reports.
- Zalles, Viviana, Matthew C. Hansen, Peter V. Potapov, Diana Parker, Stephen V. Stehman, Amy H. Pickens, Leandro Leal Parente et al. 2021. "Rapid expansion of human impact on natural land in South America since 1985." *Science Advances* 7(14): eabg1620.

The Benefits and Costs of
Reaching Net Zero Emissions in
Latin America and the Caribbean

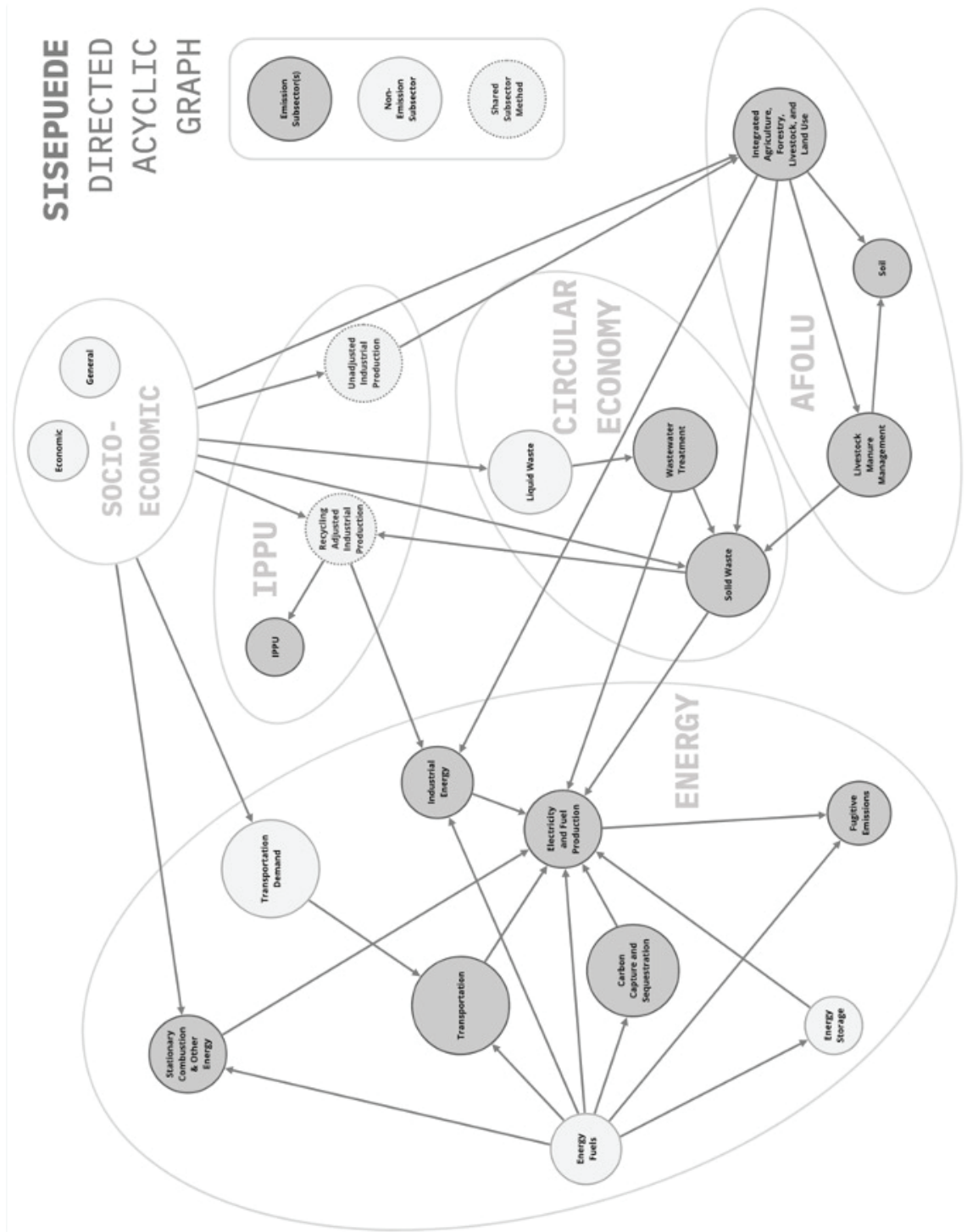
Apéndices Técnicos

SiSePuede Analytical Framework

SiSePuede is an open source, robust modeling framework for emission accounting based on the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Eggleston et al., 2006) and subsequent 2019 Revision (Buendia et al., 2019). The framework, which is written in Python and Julia, includes several analytical components used to facilitate exploratory modeling of sectoral transformations and their effects on demands and emissions, including an integrated multisector emissions model; an uncertainty quantification system based on Latin Hypercube sampling; and scalable database generation and scenario management.

The SiSePuede integrated emission model includes four emission accounting sectors—Agriculture, Forestry, and Land Use (AFOLU), Circular Economy (waste management), Energy, and Industrial Processes and Product Use (IPPU)—in addition to a shared driver sector, the Socioeconomic sector. Each sector is divided into multiple accounting subsectors, which include refined emissions that correspond to different IPCC emission accounting codes.

TECHNICAL APPENDICES
SiSePuede Analytical Framework



Note: Arrows indicate data flows between submodules in SiSePuede.

Figure TA1. Technical modeling framework for SiSePuede.

AFOLU models six subsectors: agriculture, forestry, land use, livestock, livestock manure management, and soil. These six sectors are based on volume 4 of the IPCC guidance for national greenhouse gas (GHG) inventories and include extensive treatment of key emission phenomena, including crop residues and burning, forest sequestration, land-use conversion and use, enteric fermentation, manure management, fertilizer application, and soil carbon sequestration in mineral and organic soils. The land-use subsector models land-use transitions directly as a discrete Markov chain, allowing for a detailed accounting of emissions stemming from land-use conversion. Furthermore, it includes a novel mechanism, known as the land-use reallocation factor, to model land-use changes that occur in response to changing demands for livestock and crops and reconcile these demands with exogenous expectations about land-use changes. Demands for crops and livestock production generally are based on historical production, imports, and exports and are responsive to changes in trade and gross domestic product (GDP), GDP/capita, and population.

Circular Economy includes three subsectors: liquid waste, solid waste, and wastewater treatment. These three sectors are derived from volume 5 of the IPCC guidance for national greenhouse gas inventories and include detailed emissions estimates from wastewater treatment and management pathways, solid waste treatment pathways (including a first-order decay model of landfilled waste), and recycling, which then gets passed to the industrial production model to estimate changes for producing virgin materials. Waste generation primarily is driven by per-person generation factors, which are responsive to changes in GDP, GDP/capita, and population and other sectors, including livestock manure management and supply-chain loss in agriculture.

Energy includes nine model subsectors, six of which are emission subsectors: carbon capture and sequestration, energy fuels, energy storage, energy technology (fuel production, including electricity), fugitive emissions, industrial energy, stationary combustion and other energy, transportation, and transportation demands. These sectors include estimates of energy demands, emissions from fuel combustion, and fuel consumption using information from other sectors as input, including GDP, industrial production, number of households, and more. All energy demands for fuel production—including electricity, petroleum refinement, coal mining, natural gas production and processing, and hydrogen production—are passed to a least-cost optimization model developed in Julia NEMO (SEI, 2023) to estimate emissions from energy and fuel production.

IPPU is based on volume 3 of the IPCC Guidance for National Greenhouse Gas (GHG) Inventories. The IPPU sector includes estimates of emissions from a range of gases released during industrial production, including a by-gas accounting of several fluorinated compounds (including HFCs, PFCs, and other FCs) derived from other bottom-up estimates in the literature. Industrial production primarily is driven by domestic demands and trade and is responsive to changes in GDP, GDP/capita, and recycling (for applicable industries). In the SiSePuede Directed Acyclic Graph (DAG), industrial production functions are stored in IPPU and accessed in both Circular Economy and AFOLU.

Finally, the Socioeconomic sector includes two subsectors: general and economy. These two subsectors are used to manage exogenously defined drivers that are shared across emission models, such as GDP and population. The Socioeconomic subsector includes some simple calculations—such as GDP/capita, the number of households, and various rates of growth in drivers—but does not account for any emissions.

SiSePuede accounts for gas-specific emissions across several greenhouse gases, including methane, carbon dioxide, nitrous oxide (CH₄, CO₂, N₂O), and numerous PFCs, HFCs, and other fluorinated compounds. Accounting can be set to reflect different global warming potentials (GWP), including 20-, 100-, and 500- year GWPs.

SiSePuede Calibration

Figure 2 describes the calibration process for SiSePuede and how this interrelates with simulation runs. In the first step, two sets of input parameters are defined: a) parameters that have observed historical data and b) parameters that need to be estimated through calibration. For the latter, historical emissions are the response of interest used in the calibration process. The calibration process searches for a set of calibrated parameters that minimize the error between the model-simulated emissions and observed emissions. This process occurs separately for each sector.

A minimization problem is defined where the objective function to be minimized is the mean square error between the simulated and observed series of carbon dioxide equivalent (CO₂e) emissions of each sector.

$$\min \frac{1}{T} \sum_t^T (CO_2e \text{ emissions}_{s,t} - \widehat{CO_2e \text{ emissions}}_{s,t})^2$$

s.t

$$x_1, x_2, \dots, x_n \in (0, c), \text{ where } c \in \mathbb{R}$$

where

- $\widehat{CO_2e \text{ emissions}}_{s,t}$ is the estimated CO₂e SiSePuede emissions in sector s at time t;
- $CO_2e \text{ emissions}_{s,t}$ is the historical series (we used climate watch data for this study, but other sources can also be used); and

vector x_1, x_2, \dots, x_n is a set of scaling factors that multiply a set of input variables to be calibrated. These calibrated parameters include factors for which we do not have data or for which we require a more reliable baseline.

Once a calibrated set of input parameters is estimated for historical conditions, this set is then projected in the future varying as two groups of parameters: a) parameters that describe how transformations will evolve over time and b) parameters that describe how exogenous trends will evolve in the future. Then this database is used as an input database for SiSePuede. For each input database, a SiSePuede simulation run will result in projected emissions, benefits, and costs over time.

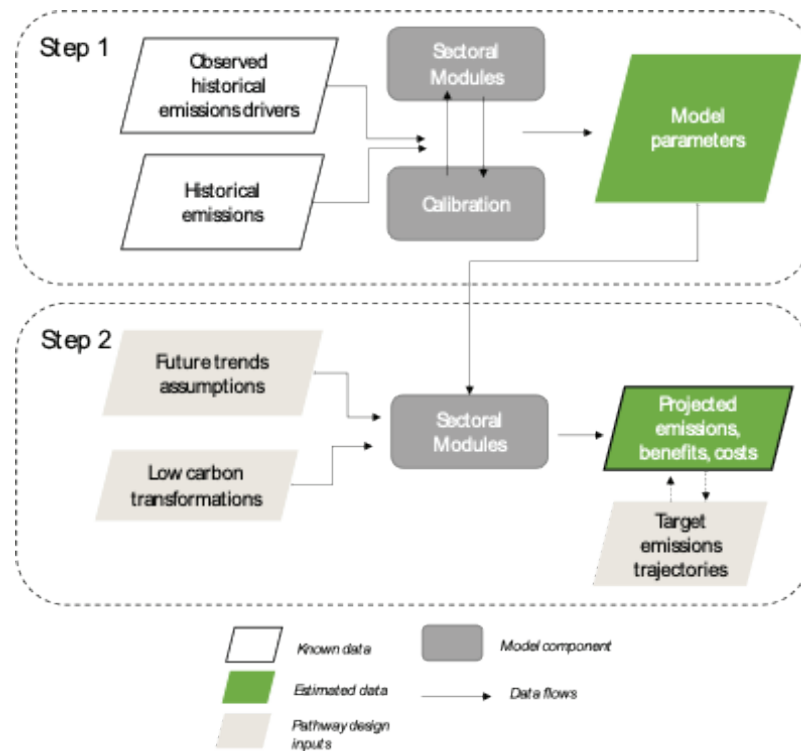


Figure TA2. Calibration workflow.

The minimization problem is solved using two bio-inspired algorithms:

- Genetic binary (Sadri et al., 2006); and
- Particle Swarm Optimization (PSO) (Wang et al., 2018).

Genetic algorithms balance exploitation and exploration. This balance is achieved by the individuals of the population's selection mechanism based on their aptitude and the genetic crossover operator. The PSO algorithm engages a group of individuals (particles) from different points in the search space, each guided by the collective action's natural life principles to find an optimal solution.

SiSePuede calibration occurs via cross-validation such that the process is repeated randomly selecting subsets of the variation in the response of interest (i.e., sectorial emissions). Figures 3 and 4 exemplify the calibration performance for all countries considered in this study across two sectors: AFOLU and Liquid Waste. The dark blue line indicates known historical data of the response of interest (i.e., sector emissions), while the light-blue lines display simulated results for different instances of cross validation. As these figures show, a successful calibration process is one in which different calibration instances revolve around the historical time series of the response of interest.

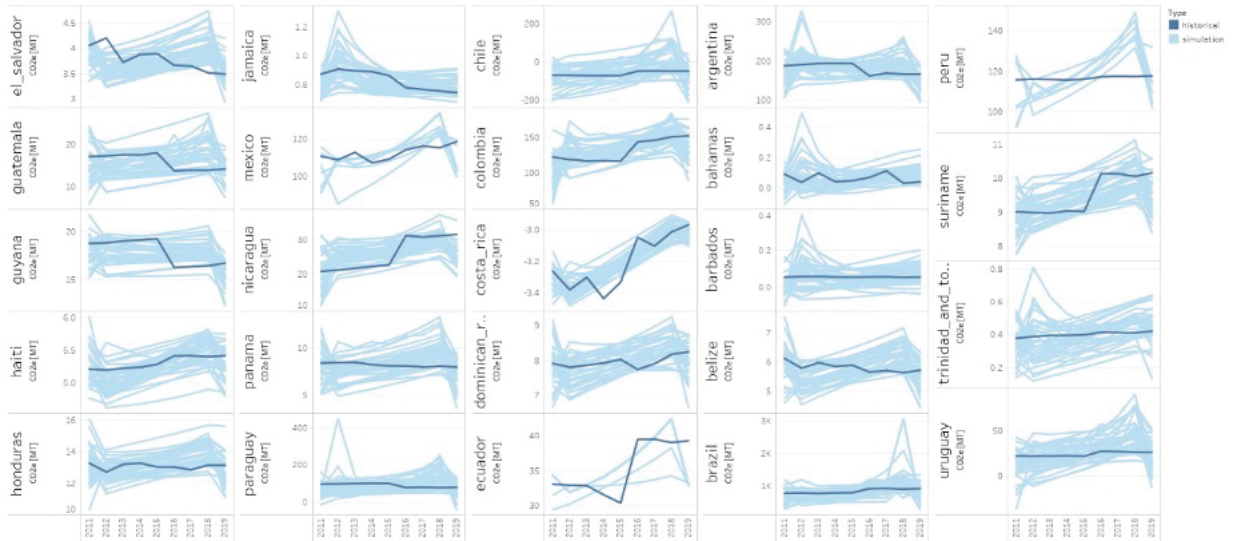


Figure TA3. Agriculture, Forestry, and Land Use (AFOLU) calibration.

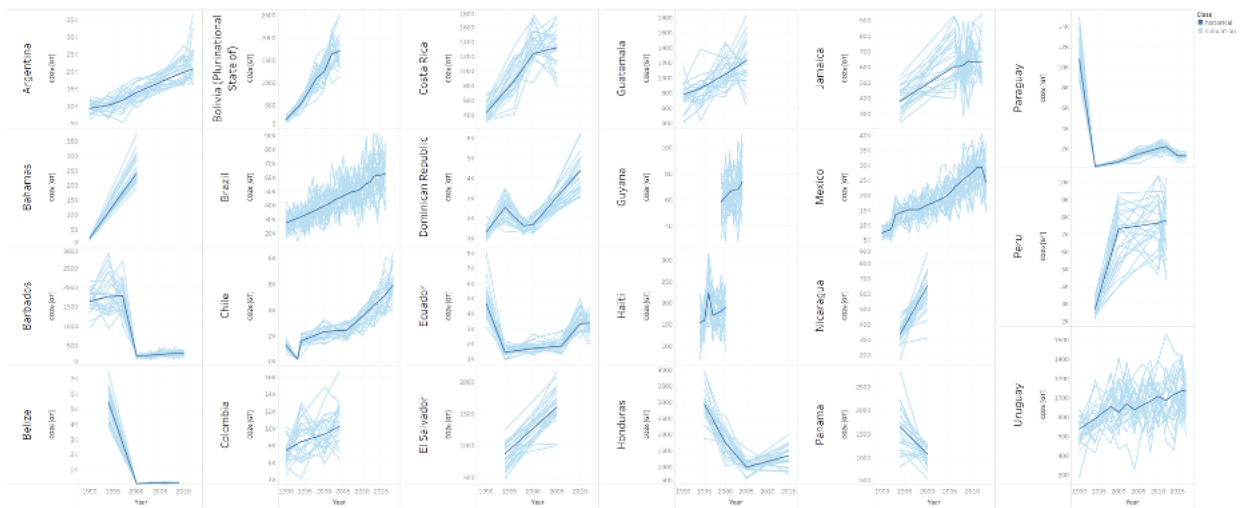


Figure TA4. Liquid waste calibration.

Each instance of cross-validation is associated with a specific database of input parameters, such that, after cross-validation, for each calibration parameter, point-estimates that aggregate the behavior across the cross-validation set can be estimated. Figure 5 shows this exercise for a subset of calibration parameters. Note that since this process is carried out for each country used in the simulation, it is possible to estimate and compare mean and variance variation across countries.

Once simulations are executed, it is possible to run the model using the mean values of cross-validation as input parameters to the model. However, because using the mean value of cross-validation will result in an initial condition different to the one observed—for example, in the last available data point of historical data—it is possible to rescale the simulation data such that the simulation’s intertemporal variation reflects the initial conditions of a particular emissions trajectory more accurately.

| Notion | Avg. Adjusted Level Annual Emissions (kg) | Variance of Adjusted Level Annual Emissions (kg) | Avg. Adjusted Level Annual CO2e (kg) | Variance of Adjusted Level Annual CO2e (kg) | Avg. Adjusted Level Annual CH4 (kg) | Variance of Adjusted Level Annual CH4 (kg) | Avg. Adjusted Level Annual N2O (kg) | Variance of Adjusted Level Annual N2O (kg) | Avg. Adjusted Level Annual HFC (kg) | Variance of Adjusted Level Annual HFC (kg) | Avg. Adjusted Level Annual PFC (kg) | Variance of Adjusted Level Annual PFC (kg) | Avg. of Emissions (kg) | Variance of Emissions (kg) | Avg. of Emissions (kg) | Variance of Emissions (kg) | Avg. of Emissions (kg) | Variance of Emissions (kg) | Avg. of Emissions (kg) | Variance of Emissions (kg) | | |
|---------------------|---|--|--------------------------------------|---|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|-------|-------|
| argentina | 1.023 | 0.006 | 1.023 | 0.006 | 1.023 | 0.006 | 1.023 | 0.006 | 1.023 | 0.006 | 1.023 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.011 | 0.044 | 0.016 | 0.067 | 1.022 | 0.025 | 1.023 | 1.023 |
| barbados | 0.970 | 0.002 | 0.970 | 0.002 | 0.970 | 0.002 | 0.970 | 0.002 | 0.970 | 0.002 | 0.970 | 0.002 | 1.120 | 0.008 | 1.038 | 0.018 | 0.976 | 1.170 | 0.060 | 0.970 | 0.970 | 0.970 |
| barbados | 1.071 | 0.001 | 1.071 | 0.001 | 1.071 | 0.001 | 1.071 | 0.001 | 1.071 | 0.001 | 1.071 | 0.001 | 0.928 | 0.008 | 1.018 | 0.034 | 0.942 | 1.064 | 0.074 | 1.071 | 1.071 | 1.071 |
| belize | 0.978 | 0.001 | 0.978 | 0.001 | 0.978 | 0.001 | 0.978 | 0.001 | 0.978 | 0.001 | 0.978 | 0.001 | 1.003 | 0.007 | 1.024 | 0.011 | 0.948 | 0.923 | 0.038 | 0.978 | 0.978 | 0.978 |
| bolivia | 0.957 | 0.002 | 0.957 | 0.002 | 0.957 | 0.002 | 0.957 | 0.002 | 0.957 | 0.002 | 0.957 | 0.002 | 0.944 | 0.009 | 0.982 | 0.011 | 1.012 | 1.009 | 0.009 | 0.957 | 0.957 | 0.957 |
| brasil | 1.009 | 0.006 | 1.009 | 0.006 | 1.009 | 0.006 | 1.009 | 0.006 | 1.009 | 0.006 | 1.009 | 0.006 | 1.017 | 0.002 | 1.107 | 0.004 | 0.974 | 1.024 | 0.142 | 1.009 | 1.009 | 1.009 |
| chile | 0.991 | 0.007 | 0.991 | 0.007 | 0.991 | 0.007 | 0.991 | 0.007 | 0.991 | 0.007 | 0.991 | 0.007 | 0.981 | 0.025 | 1.047 | 0.019 | 0.934 | 1.088 | 0.007 | 0.991 | 0.991 | 0.991 |
| colombia | 1.006 | 0.002 | 1.006 | 0.002 | 1.006 | 0.002 | 1.006 | 0.002 | 1.006 | 0.002 | 1.006 | 0.002 | 0.960 | 0.015 | 0.980 | 0.007 | 0.968 | 1.110 | 0.117 | 1.006 | 1.006 | 1.006 |
| costa_rica | 1.014 | 0.004 | 1.014 | 0.004 | 1.014 | 0.004 | 1.014 | 0.004 | 1.014 | 0.004 | 1.014 | 0.004 | 1.011 | 0.009 | 0.961 | 0.017 | 0.949 | 1.006 | 0.069 | 1.014 | 1.014 | 1.014 |
| dominican_republic | 1.012 | 0.006 | 1.012 | 0.006 | 1.012 | 0.006 | 1.012 | 0.006 | 1.012 | 0.006 | 1.012 | 0.006 | 1.010 | 0.015 | 0.990 | 0.008 | 1.080 | 1.020 | 0.008 | 1.012 | 1.012 | 1.012 |
| ecuador | 0.950 | 0.004 | 0.950 | 0.004 | 0.950 | 0.004 | 0.950 | 0.004 | 0.950 | 0.004 | 0.950 | 0.004 | 1.001 | 0.013 | 1.043 | 0.007 | 1.101 | 1.040 | 0.009 | 0.950 | 0.950 | 0.950 |
| el_salvador | 1.017 | 0.003 | 1.017 | 0.003 | 1.017 | 0.003 | 1.017 | 0.003 | 1.017 | 0.003 | 1.017 | 0.003 | 1.020 | 0.034 | 1.004 | 0.007 | 0.982 | 1.096 | 0.000 | 1.017 | 1.017 | 1.017 |
| guatemala | 1.034 | 0.006 | 1.034 | 0.006 | 1.034 | 0.006 | 1.034 | 0.006 | 1.034 | 0.006 | 1.034 | 0.006 | 0.988 | 0.018 | 0.927 | 0.017 | 0.948 | 1.028 | 0.069 | 1.034 | 1.034 | 1.034 |
| guinea | 0.979 | 0.002 | 0.979 | 0.002 | 0.979 | 0.002 | 0.979 | 0.002 | 0.979 | 0.002 | 0.979 | 0.002 | 1.044 | 0.002 | 1.038 | 0.014 | 0.990 | 1.097 | 0.174 | 0.979 | 0.979 | 0.979 |
| haiti | 1.010 | 0.003 | 1.010 | 0.003 | 1.010 | 0.003 | 1.010 | 0.003 | 1.010 | 0.003 | 1.010 | 0.003 | 1.036 | 0.014 | 1.025 | 0.018 | 0.974 | 1.011 | 0.018 | 1.010 | 1.010 | 1.010 |
| honduras | 1.041 | 0.004 | 1.041 | 0.004 | 1.041 | 0.004 | 1.041 | 0.004 | 1.041 | 0.004 | 1.041 | 0.004 | 1.002 | 0.006 | 0.961 | 0.018 | 0.926 | 1.045 | 0.164 | 1.041 | 1.041 | 1.041 |
| jamaica | 1.035 | 0.003 | 1.035 | 0.003 | 1.035 | 0.003 | 1.035 | 0.003 | 1.035 | 0.003 | 1.035 | 0.003 | 1.008 | 0.015 | 1.039 | 0.008 | 1.017 | 1.037 | 0.009 | 1.035 | 1.035 | 1.035 |
| mexico | 0.999 | 0.005 | 0.999 | 0.005 | 0.999 | 0.005 | 0.999 | 0.005 | 0.999 | 0.005 | 0.999 | 0.005 | 0.923 | 0.015 | 1.095 | 0.016 | 1.062 | 1.120 | 0.114 | 0.999 | 0.999 | 0.999 |
| nicaragua | 1.028 | 0.001 | 1.028 | 0.001 | 1.028 | 0.001 | 1.028 | 0.001 | 1.028 | 0.001 | 1.028 | 0.001 | 0.933 | 0.009 | 1.042 | 0.012 | 0.948 | 1.057 | 0.209 | 1.028 | 1.028 | 1.028 |
| panama | 0.996 | 0.006 | 0.996 | 0.006 | 0.996 | 0.006 | 0.996 | 0.006 | 0.996 | 0.006 | 0.996 | 0.006 | 1.000 | 0.019 | 1.018 | 0.015 | 1.048 | 1.008 | 0.066 | 0.996 | 0.996 | 0.996 |
| paraguay | 0.961 | 0.002 | 0.961 | 0.002 | 0.961 | 0.002 | 0.961 | 0.002 | 0.961 | 0.002 | 0.961 | 0.002 | 0.989 | 0.015 | 1.004 | 0.019 | 0.968 | 1.180 | 0.069 | 0.961 | 0.961 | 0.961 |
| peru | 1.011 | 0.007 | 1.011 | 0.007 | 1.011 | 0.007 | 1.011 | 0.007 | 1.011 | 0.007 | 1.011 | 0.007 | 1.053 | 0.011 | 0.911 | 0.016 | 1.045 | 1.071 | 0.111 | 1.011 | 1.011 | 1.011 |
| suriname | 0.980 | 0.003 | 0.980 | 0.003 | 0.980 | 0.003 | 0.980 | 0.003 | 0.980 | 0.003 | 0.980 | 0.003 | 0.990 | 0.017 | 1.106 | 0.009 | 0.983 | 1.127 | 0.131 | 0.980 | 0.980 | 0.980 |
| trinidad_and_tobago | 1.028 | 0.006 | 1.028 | 0.006 | 1.028 | 0.006 | 1.028 | 0.006 | 1.028 | 0.006 | 1.028 | 0.006 | 0.999 | 0.014 | 0.997 | 0.007 | 1.018 | 1.020 | 0.088 | 1.028 | 1.028 | 1.028 |
| uruguay | 0.993 | 0.003 | 0.993 | 0.003 | 0.993 | 0.003 | 0.993 | 0.003 | 0.993 | 0.003 | 0.993 | 0.003 | 0.930 | 0.017 | 0.977 | 0.001 | 1.034 | 1.044 | 0.000 | 0.993 | 0.993 | 0.993 |
| venezuela | 0.982 | 0.007 | 0.982 | 0.007 | 0.982 | 0.007 | 0.982 | 0.007 | 0.982 | 0.007 | 0.982 | 0.007 | 1.003 | 0.009 | 0.972 | 0.020 | 1.012 | 1.008 | 0.164 | 0.982 | 0.982 | 0.982 |

Figure 5. Point estimate and standard deviation of estimated parameters.

Contrast with Other Modeling Approaches

SiSePuede takes a unique, sectoral transformation-centered approach to modeling emissions, contrasting with other common modeling techniques. For example, integrated assessment models (IAMs) are used to model biophysical emissions processes as driven by anthropogenic activity, and some include biophysical feedback. In accordance with IPCC inventory guidelines, SiSePuede bases emissions on emission factors that respond to drivers, though certain phenomena—such as methane emissions from anaerobic decomposition in solid waste landfills, which are modeled using a first-order decay model—include biophysical treatments. Biophysical feedback such as impacts of climate change on hydropower production or crop yield factors are treated as uncertain factors that can be explored within reasonable expected ranges.

Given their computational requirements, IAMs require significant computational power for evaluating portfolios of specific policy transformations and sectoral actions because they are often massive and chaotic, requiring extensive time and computational power to assess a single scenario. The relative numerical simplicity of calculations in SiSePuede and the integrated uncertainty framework allow extensive exploration over uncertainties at highly refined levels, facilitating a robust exploration of strategies. SiSePuede endogenizes uncertainty exploration through Latin Hypercube sampling across exogenous uncertainties and intervention effects, a robust data management system, and scalable computational architecture.

SiSePuede also differs significantly from general- and partial-equilibrium models (PEMs and GEMs). Equilibrium models, which endogenize economic outcomes based on exogenous factors such as prices, are another class of models paired with emission factors to estimate how changes in economic activity may drive emissions changes. However, while GEMs advantageously endogenize demands, they can be extremely difficult to calibrate and solve, especially when exploring large parameter and variable spaces, such as supplies and demands for a refined range of products and services across an entire economy. While SiSePuede does not endogenize supplies and demands through market-clearing conditions, it does facilitate exploration over combinations of prices and behaviors that then can be used to identify policy-relevant scenarios across a range of potential futures.

SiSePuede relies on some key assumptions to deal with potential conflicts that may arise from the use of exogenous variable specifications. Most notably, consider the interaction between agriculture and livestock demands and land use. Demand for crops and animal products are modeled endogenously as a combination of historical demand, import fractions, exogenous exports, red meat consumption behavior, changes to productivity, and elasticities to GDP and GDP/capita (used as an endogenous proxy for average income). Land-use transition probabilities also are defined exogenously in the model, representing expectations for region's future land use. Because cattle and cropland drive extensive shifts in land use, these two trajectories can come into conflict if left unresolved.

To reconcile differences in exogenous specifications of demands for land use, SiSePuede introduces a novel parameter referred to as the land-use reallocation factor. The land-use reallocation factor represents the fraction of land needed (or not needed) for crop and livestock production that is adjusted to ensure land use meets demands. In the initial state, demands for crop and livestock production are combined with land-use prevalence to determine a baseline carrying capacity for grazing livestock. As livestock stock demands change, baseline carrying capacities—which can be scaled up or down to represent changes to productivity—are used to estimate land-use requirements needed to fulfill these domestic production demands. If demands for crops or livestock increase, then more land is required. Alternatively, if livestock demands decrease or carrying capacities increase, more land may be available for restoration or reforestation, critical components of decarbonization pathways.

The land-use reallocation factor determines the fraction of land-use deficit, or how much is needed less how much is specified, that is reallocated away from exogenous transition trajectories to meet demands for grazeland. Using this value, columns on the land-use transition matrix¹ are scaled accordingly to ensure transitions into grazeland meet demands. If the factor is 0, then no land use is reallocated away from exogenous land-use transition trajectories, and all livestock demands that exceed carrying capacity are used to adjust exports, while deficits are met with new imports. If the factor is set to 1, then transition probabilities are scaled to ensure that pastures and croplands will meet production demands precisely. Any value in-between is the fraction of land that is moved away from exogenous specification through column scaling, representing a mix between the two approaches.

Accessing SiSePuede

The complete documentation for SiSePuede—including the installation instructions, detailed mathematical specifications, variable information, and schema—are available at <https://sisepuede.readthedocs.io>. SiSePuede is written in Python and Julia. NemoMod was developed by Stockholm Environmental Institute and is available under the Apache 2.0 License from <https://github.com/sei-international/NemoMod.jl>. Python and Julia model code are available for use under the GNU Public License at <https://github.com/jcsyme/sisepuede>, and a precompiled Docker image can be used to run the latest version of the model, available at <https://hub.docker.com/r/jcsyme816/sisepuede>.

¹ SiSePuede treats the land-use transition matrix as a row-stochastic Markov chain.

Appendix A. Agriculture

The agricultural sector consists of crop and livestock production. The demand for crops and livestock is driven by population and GDP growth. Crops and livestock are distinguished by type according to FAO categories. We discuss crop and livestock production separately.

Crops

Crop historical data and projections

Emissions in crops are produced by the release of soil carbon in tillage, fertilizer applications and crop liming, crop burning, organic material's decomposition, and methane emissions from paddy rice fields. Fossil fuels burned by on-farm equipment are accounted for in industrial energy, where demands for energy are driven by agriculture and livestock production. Agriculture emissions are a product of the data in Table A.1.

Table A.1 Data and methods

| Data | Method for historical data | Method for projections |
|--|--|--|
| Quantity of agricultural demand per agricultural category per country | Production volumes are estimated using the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) Production database (FAO, 2023c) Exports and import volumes are estimated using the FAO Trade database (FAO, 2023d) | We use the US Department of Agriculture (USDA) Commodity and Food Elasticities Database for estimating crop demand income elasticities by country. We combine these elasticities with gross domestic product (GDP) per capita projections to estimate baseline demand. |
| Yield (land area and fertilizer and other inputs needed per unit of crop output) | Yields and area harvested figures are estimated using FAO Production database (FAO, 2023c) Fertilizer use is estimated based on data from the International Fertilizer Association (IFA, 2023) | Yields are projected to grow 1.6% per year from 2020 to 2050. Areas and volumes of production, exports, and imports are determined endogenously in the simulation. |
| Emissions intensity (emissions per ton of crop produced) | Fertilizer use emission factors based on Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Table 11.1, volume 4 (IPPC, 2019) | Factors are assumed to remain constant under baseline conditions (i.e., no transformations). |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration are obtained from Climate Watch (2022) | Production of different crops and technologies and practices used in agriculture determine emissions levels. |

Note: To map SiSePuede crops categories to FAO crops categories, we developed data crosswalks that allow us to aggregate statistical information from FAO to be used as input in SiSePuede.

Transforming crops

While many individual practices can address emissions from crop production, we broadly group practices into three transformations: improving the use of fertilizers, expanding conservation agriculture, and improving rice management, consistent with strategies from the Environmental Protection Agency or EPA (2019) and McKinsey (2019 & 2020) that are non-duplicative and have significant applicability in Latin America and the Caribbean (LAC). The fourth, discussed in the section “Crosscutting Changes in Agriculture” is to increase overall sector productivity, in ways that do not specifically target emissions.

Table A.2 shows transformations to reduce emissions from crops. Table A.3 shows the technical costs and benefits of these transformations, and Table A.4 shows the sector-specific non-technical costs and benefits. The costs and benefits of transforming agriculture on energy and waste management are valued endogenously in those sectors.

Table A.2 Crop transformations

| Transformation | Description | Implementation (by 2050) |
|------------------------------|--|---|
| Reduce excess fertilizer use | Use of fertilizer in agriculture is the primary source of anthropogenic nitrous oxide (N ₂ O) emissions (Tian et al., 2020). Global overuse and misapplication of N ₂ O is a significant and avoidable contributor to these emissions (McKinsey et al., 2020). This strategy targets applying excess nitrogen (i.e., the amount of fertilizer that can be reduced without affecting yield), which is highest in countries such as China and India that subsidize fertilizer use but is also significant in Latin America (West et al., 2017). Table X.2 specifies per-hectare nitrogen (N) input that is not taken up by harvested crops, of which 10-30% could be avoided without an impact on yield. | Any fertilizer historically applied beyond the benefits it yields is avoided. |

| | | |
|---------------------------------|---|--|
| Expand conservation agriculture | Conservation agriculture is the term given to agricultural practices that seek to preserve soil and ecosystem health. FAO describes three inter-related practices: minimum tilling, maintaining permanent soil cover, and diversifying plant species (FAO, 2022). While Latin America is already a leader in no-till practices (McKinsey et al., 2020; Kassam et al., 2019; Sperow, 2020), there is room for improving these practices' extent and scope, particularly given the poor quality of some current efforts (Kassam, 2019). | High-quality conservation agricultural practices are expanded to 80% of crop land on which grains and staples are grown, excluding rice (which is addressed in the next transformation). |
| Improve rice management | Many practices can reduce emissions associated with growing rice, including improved water management, fertilizer practices, tillage practices, rice variety choices, residue management, and seeding practices (McKinsey et al., 2020; Chirinda et al., 2018). | All rice growing is transitioned to these improved practices. |
| Improve sector productivity | This encompasses many sector-wide improvements that increase productivity. | This is described in the section "Crosscutting Agriculture Changes." |

Notes: West et al. (2017) estimate the excess N per hectare (ha) per country globally (measured as the difference between rates of nutrient input versus nutrient removal from plant harvesting). They estimate that 10-30% could be removed without impact on yield. Data are available for download at [https://www.nature.com/articles/s41562-017-0188-4](#); accessed May 25, 2022).

Table A.3 Crop transformations' technical costs

| Transformation | Technical costs (Labor cost average in 2019 USD) (Negative values indicate avoided costs, i.e., savings) | Notes and data |
|---------------------------------|---|---|
| Reduce excess fertilizer use | -\$200/ton of fertilizer | West (2017), Good and Beatty (2011). We calculate the cost of eliminating excess N as the avoided cost of fertilizer using the minimum, average, and maximum costs per ton of urea over the past five years available for download, accessed June 17, 2023. |
| Expand conservation agriculture | -\$20/ha under conservation agriculture | Savings from avoided fuel and labor expenditures make this transformation a technical cost savings. Crop-specific estimates include savings of \$232/ha for soy and \$84/ha for maize (SHP, EDF, and Isom [2021]), and general savings estimated at \$23/ha (Frank et al., 2018). |
| Improve rice management | -\$30/ha under improved rice management | McKinsey (2020) describes various rice-management practices and techniques that can yield significant carbon reductions, all at negative technical cost. Chirinda et al.'s (2018) meta-analysis of rice management describes impacts on greenhouse gases (GHGs) and yields in Latin America for a variety of these practices, and we use that data to inform the ranges. Chakraborty et al. (2017, Supplementary Table S8) describes the difference in costs for these practices globally, which we adapt here, adjusting in dollar values from 2017 to 2019. |

Table A.4 Benefits and costs of transforming agriculture

| Benefit or cost | Value (LAC average in 2019 USD) (Positive indicates benefits) | Notes and data sources |
|-------------------------------------|---|---|
| Avoided nitrate leaching and runoff | \$60/ton of fertilizer avoided | Good and Beatty (2011, Box 2 and Table 4) estimate the total environmental cost of nitrate leaching and runoff to be 44% of the total cost of excess fertilizer applied, of which 70% of is attributed to nitrate leaching and runoff. The value of avoided nitrate leaching and runoff is estimated at 30% of the per-ton cost of fertilizer in the prior table. |
| Improved soil health | \$350/ha | Telles et al. (2018) estimate the difference in agricultural land values in Brazil in 2006 under different tillage practices. They find that on average, hectares of no-till are over \$700 more valuable per acre than those under conventional tillage practices, which can serve as a proxy for the benefits of healthier soils from conservation tillage. Recognizing that agricultural land values vary greatly by country and that the causal direction of the relationship between value of land and tillage practice may be complex, we use a conservative estimate of the difference to value the benefits of this practice. |

Note: LAC stands for Latin America and the Caribbean.

Livestock

Livestock historical data and projections

Emissions in livestock are produced by enteric fermentation (for ruminants), manure, and converting land to pasture, which we discuss in the land use and forests sector. Livestock emissions are a product of the data in Table A.5.

Table A.5 Data and methods

| Data | Method For historical data | Method for projections |
|------------------------------|--|--|
| Initial livestock head count | Live animals head count is estimated using UN FAO Production database (FAO, 2023c) Export and import volumes are estimated using FAO Trade database (FAO, 2023d) | We estimate livestock demand's elasticity to GDP per capita based on data from Komarek et al. (2021). We combine these elasticities with GDP per capita projections to estimate baseline demand. |
| Dry matter consumption | Daily dry matter consumption is taken from Holechek (1988) | Dry matter consumption is assumed constant through the simulation. However, areas and volumes of production, exports, and imports are determined endogenously in the simulation. |
| Emissions intensity | Enteric fermentation factors' values are taken from IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Tables 10.10-10.11, volume 4, chapter 10 (IPPC, 2019) Livestock manure management fractions are taken from IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Table 10A.6, volume 4, chapter 10 (IPPC, 2019) | Factors are assumed to remain constant under baseline conditions (i.e., no transformations). |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration are obtained from Climate Watch (2022) | Meat demand, along with the technologies and practices used for production, determine emission levels in the future. |

Notes: Export data contain records on processed animal products. We developed a crosswalk to convert these export statistics to equivalent animal head counts. Daily dry matter consumption is used to allocate grassland to grazing animals and estimate carrying capacity under the assumption that livestock's distribution across grazelands is uniform, grasslands are homogenous, and there is no mixed grazing. Climate Watch data aggregate crops and livestock into one single sector named "agriculture." We approximate livestock emissions using CH4 totals produced by Climate Watch.

Table A.7 Livestock transformations' technical costs

| Transformation | Cost | Source |
|-------------------------------|--------------|---|
| Reducing enteric fermentation | \$40/head | The cost of reduced enteric fermentation is taken as the range of costs in Table 5-59 in EPA (2019) for fermentation inhibitors, and the nominal value is the average of that range. McKinsey (2020) reports breed change as a no-cost transformation. The costs of enteric fermentation inhibitors are converted from 2010 to 2019 dollars and adjusted to LAC values. |
| Managing manure | \$10/TLU | Frank et al. (2018) suggest global costs of digesters from \$8-\$38/ Tropical livestock units (TLU). We use an average for digesters and then adjust to account for the fact that much of the manure in this transformation is handled by lower-cost methods such as spreading on fields. |
| Silvopasture | \$45/ha/year | We conservatively estimate silvopasture's cost as the same as the cost of restoring degraded land, although this may be a higher cost than is seen in the literature. |

Crosscutting Agriculture Supply-and-Demand Transformations

Several transformations shape the underlying supply, demand, and productivity of the agricultural system and can have significant impacts on emissions. They include shifting consumer diets to reduce meat consumption, reducing food losses and waste, improving productivity, and changing agricultural land-use policy.

Table A.8 shows these transformations, and Table A.9 shows their technical costs and benefits. Table A.10 shows the sector-specific non-technical costs and benefits. The costs and benefits of these transformations on land use are described in the land use and forestry sector.

Table A.8 Crosscutting transformations

| Transformation | Description | Implementation (by 2050) |
|--|---|--|
| Improving diets | Latin America has high rates of obesity and poor nutrition, with attendant social health costs (Popkin and Reardon, 2018). This transformation transitions the population in aggregate to a healthier and more sustainable diet consistent with the vegetarian diet described in Table S.7 in Springmann et al. (2016). | By 2040, overall dietary consumption has shifted in a manner that—in aggregate—is consistent with 40% of the population adopting a vegetarian diet, although the distribution of dietary change across the population will vary. Some will forego meat, others will reduce their consumption, and still others who have inadequate access to protein will increase it. |
| Reducing food losses and waste in the supply chain | Food waste and loss is a massive economic cost to LAC and globally (Hanson et al., 2022; Flanagan et al., 2019). As of 2020, an average of 12% of food produced on the farm in LAC is lost before it reaches retailers (FAO, undated). This is approximately 171 kg per capita (UNEP, 2018). This strategy reduces food waste throughout the agriculture supply chain, from the farm through production, processing, handling and storage, and distribution and marketing. (Post-market waste by consumers is handled in the waste sector.) | The maximum implementation of this transformation involves halving food losses in the supply chain, consistent with Hanson et al.'s (2022) recommendations. |
| Improving agricultural and livestock productivity | Latin America is not yet at the frontier of agricultural productivity. This transformation accelerates total factor productivity in Latin America to Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) levels. | Agricultural productivity will grow 1.6% per year throughout 2050 |
| Redirecting gains in productivity to land conservation | As agricultural or livestock productivity increases, or domestic demand decreases, domestic production can be reduced and land returned to native conditions. | All gains in productivity or decreases in waste or demand are used to reduce production (rather than export more). |

Table A.9 Crosscutting transformations' technical costs

| Transformation | Technical costs (LAC average in 2019 USD) (Negative values indicate avoided costs, i.e., savings) | Notes and data sources |
|---|---|---|
| Reducing supply chain losses and waste | \$400/ton of food waste avoided | Costs are based on the average per-ton costs of methods of reducing producer-side food waste in the United States, weighted by their effect size (\$700 in 2016), based on data found in the appendix of ReFED (2016), adjusted to LAC. We expect this is an overestimate of costs, given that Latin America's food industry is generally less well developed than the United States, and gains may be available at a lower cost. |
| | -\$500/ton of food waste avoided | Food waste occurs across food types, and without specific information on the types of food that are wasted and the recovery potential in the supply chain, we use the average cost of food across all product types. We reduce this value given that the food that is recovered from waste may be of lower value than food that is not wasted. |
| Increasing crop or livestock productivity | Varies by country | This is deeply uncertain. As an initial estimate, we use the average annual investment in agriculture and livestock research and development (R&D) in OECD countries, as a fraction of GDP (roughly 0.02%). We use that fraction for OECD countries in LAC; for others, we increase that fraction by 20% to account for less-developed economies. |
| Change in sector value add | Price per ton varies by type of product | The value per ton of crops and livestock varies by type and is based on producer prices from FAOStat's food producer prices dataset (FAO, undated), with TLU values (FAO, 2023) and average production efficiencies for livestock (Williams and Anderson, 2020). |

Table A.10 Crosscutting agricultural transformations' non-technical benefits and costs

| Value | Value (LAC average in 2019 USD) (Positive indicates benefits) | Notes and data sources |
|---|---|--|
| Household grocery costs from improved diets | \$385 per person per year transitioned to a better diet | The annual cost of food in the improved diet described by Springmann et al., (2016) is less than the existing average diet, with food prices in LAC based on Springmann et al. (2017) and adjusted to 2019 dollars. |
| Health benefits of better diets | \$1,750/per person per year transitioned to a better diet | The health benefits of a dietary change is calculated based on the aggregate annual health benefits defined in Springmann et al. (2016) for LAC in 2050. The costs are deeply uncertain: a direct-costs approach estimates costs of \$100B in LAC; a value-of-statistical-life approach estimates costs of approximately \$2.5 trillion (see Figures S.12 and S.13) divided by the population in LAC projected by the World Bank for 2050 (approximately 750 million). We use an average, but explore the full range, from \$350/person to \$3,500/person. |

Appendix B. Forests and Land Use

Forest emissions include CO₂ sequestration in biomass in primary and secondary forests, as well as harvested wood products, CH₄ from mangrove ecosystems, and CO₂ from forest fires. Land-use emissions include CO₂ emissions derived from converting forest land to other types of land. Land-use changes are specified using a transition matrix for all land-use types and modeled in response to changing demands for livestock and crops. Forestry is divided into primary forest, secondary forests, and mangroves. These categories reflect an aggregation of forestry types into emission-relevant categories. Land-use types include croplands, grasslands, settlements, wetlands, forests-mangroves, forests-primary, and forests-secondary.

Land-Use Historical Data and Projections

Forest and land-use emissions are a product of the data in Table B.1. Model parameters are calibrated to match model's emissions estimates in the Land Use and Forestry sector available at Climate Watch (2022), combined with forestland sequestration estimates available at the UN FAO Emissions database (FAO, 2023g). The set of calibrated parameters is comprised of transition probabilities for different land-use transitions. Estimated baseline values are modulated to reflect specific national contexts.

Table B.1 Data and methods

| Data | Method for historical data | Method for projections |
|-------------------------------------|--|--|
| Land-use conversion emission factor | Emissions factors are derived from biomass stock factors found in IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, volume 4, Tables 4.12 and 6.4 (IPPC, 2019). | Emission factors are assumed to be constant. |
| Initial land-use area proportion | Proportions of different land-use types are estimated using the UN FAO Land Use database (FAO, 2023e) and Land Cover database (FAO, 2023f). | Changes in land-use area are determined endogenously in the model as a function of expected transition probabilities, agriculture production, meat demand and deforestation rates. |
| Land-use climate fractions | Land-use types by Köppen Climate Classification are derived from KGClim 1 km data 1987-2013 averages (Cui et al., 2021). These fractions are combined with climate-dependent default IPCC factors across AFOLU to determine country-level average factors, including emissions from soil mineral carbon, forest sequestration, and biomass emissions from land-use conversion. | Country climate classification fractions are assumed to be constant. |
| Soil organic carbon stocks | Soil organic carbon stock estimates are based on SoilGrids 1 km 0-30 cm global gridded organic carbon stock data (Poggio et al., 2021). | Average per unit carbon stocks are assumed to be constant. |
| Land-use transition probability | Estimated using FAO's Land Use database (FAO, 2023e), Land Cover database (FAO, 2023f), and Emissions database (FAO, 2023g). FAO items are mapped into SiSePuede items; transition probabilities are estimated based on observed land-use changes and forest regeneration rates. | Baseline projection assumes expansion of crops and grasslands and a reduction in primary and secondary forest. |
| Forest fire emission factor | Factors are based on IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, volume 4, chapter 2, Table 2.4 (IPPC, 2019). | Factors are assumed to be constant. |

| | | |
|-----------------------------|---|---|
| Forest sequestration factor | Forest sequestration factors are based by combining IPCC forest-type biomass factors (Table 4.12, IPCC, 2019) with country-level overlays of Köppen Climate Classification (Cui et al., 2021) and land-use type (FAO, 2014) to country-specific factors by forest type. | Sequestration factors are assumed to be constant at baseline. |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration are obtained from Climate Watch (2022). Sequestered emissions in forestland are estimated using FAO's Emissions database (FAO, 2023g). | Total emissions are calculated based on the amount of secondary and primary forest sequestering emissions, and conversion emissions resulting from converting primary and secondary forests into other land uses. |

Forests and Land-Use Transformations

Table B.2 shows transformations to reduce emissions from forests and land use. It includes rehabilitation of degraded land and stopping deforestation. Table B.2 shows the technical costs and benefits of these transformations.

The value of ecosystem services is deeply uncertain. We use a single value for all forests to avoid false precision and use nominal values within the range of ecosystem services found in the literature (Taye et al., 2021, Table 3; Costanza et al., 2014, Table S.1).

Table B.3 Forestry transformations' emissions, costs, and benefits

| Transformation | Emissions | Benefits | Cost | Source |
|---------------------------------|-------------------------|---|--|--|
| Rehabilitating degraded land | Endogenously calculated | Ecosystem services of forests valued in Table B.2 | \$45 / hectare / year to turn grassland or cropland to secondary forest | Fargione et al. (2021), estimate a range of per-hectare costs of reforestation across the United States. We use the average for the US (\$1,262/ha) and adjust to LAC, amortizing this cost over 15 years. |
| Slowing or ending deforestation | Endogenously calculated | Ecosystem services of forests valued in Table B.2 | Foregone annual agricultural or livestock revenue (endogenously calculated based on the productivity per acre) | See above table. |

Appendix C. Industry

Industry includes production of cement, chemical products, construction and demolition, electronics, glass, metals, and other products and product uses. The emissions from this sector depend upon the quantity of product demanded, the emissions associated with industrial processes to create that product, the amount of energy needed to enable those processes, and the sources of energy used. Correspondingly, emissions reductions can be achieved by reducing the amount of product created, using lower-emitting input materials and processes, increasing the processes' energy efficiency, and using cleaner energy sources.

Industry Historical Data and Projections

Industrial emissions are specific to each industry, but in general are a product of the data in Table C.1.

Table C.1 Data and methods

| Data | Method for historical data | Method for projections |
|--|--|---|
| Quantity of industrial output per industry per country | Estimated using Atlas of Economic Complexity (Harvard, 2023) and global production statistics for individual products and activities estimated by Statista Search Department (2023). Our method uses exports and imports to estimate shares of global production for individual countries. Then these rates are used to allocate global production individually for each nation (see notes). | Using historical data, we calculate an elasticity of industrial output per GDP per capita and apply that to a baseline projection of the GDP and population. The estimated elasticity is bounded and trends linearly toward 1 by 2050. |
| Energy intensity (energy demand per unit of industrial output) | Energy intensities are estimated using data from the International Energy Agency (IEA) (2018). | Projected values for energy demand are estimated using a multilinear regression model that uses urban and rural population shares, and GDP as predictors of future demand. Then projected values of production are divided by the estimated energy demand per sector. |
| Energy consumed by energy source | Fractions of energy consumed by sector are estimated using data from IEA (2018). | Fractions of energy by source are assumed to remain fixed over time within each industry. |
| Emissions intensity (emissions per unit of energy, by fuel) | Historical emissions intensity is calibrated between energy consumption data (previous line) and the emissions per fuel type used in each industry (last line). | Energy emissions intensities are assumed to remain unchanged in a baseline future. |
| Process intensity (emissions per unit of industrial output) | CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O emissions, as well as those from fluorinated gases (F-gases: HFCs, PFCs, SF ₆ , NF ₃) per industrial sector are estimated using Minx et al.'s (2021) database. This database is part of the Earth System Science Data project. | Process emissions intensities are assumed to remain unchanged at a baseline future. |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in a calibration process. Emissions data for calibration is obtained from Climate Watch (2022). | Total emissions are calculated based on the energy and process intensities, and the quantities of energy consumed, or output produced, respectively. |

Notes: To calculate the industrial output's quantity, we combine information on exports and imports in shares of exports and imports as a percent of GDP, and global total production of different sectors in tonnage. Using exports and imports, we estimate total local production, assuming the following: National Production = National Demand + Exports – Imports. National demand is estimated based on shares of exports and imports as a percentage of GDP. Once national production totals are estimated, national shares of the total monetary value of production with respect to global production are estimated. Then this share is used globally to distribute the global estimate in tonnage for individual countries. Industry parameters are calibrated to match the model's emissions estimates in an industrial process with emissions data for this sector available at Climate Watch (2022). The set of calibrated parameters comprises emission-intensity factors of F-gases and fugitive emissions factors for different industrial processes. Estimated baseline values are modulated to reflect specific national contexts.

Transforming Industry

Table C.2 shows transformations to reduce emissions from industry, which include changes to industrial processes and industrial energy. Some transformations are specific to certain industries (e.g., substituting clinker in cement production) while others apply across industries (e.g., replacing virgin materials with recycled materials). Table C.3 details these transformations' technical costs and benefits, and Table C.4 outlines the industry-specific non-technical costs and benefits. The costs and benefits of transforming industry on energy, waste management, and so forth are valued endogenously in those sectors.

Table C.2 Transformations to industry

| Transformation | Description | Implementation |
|--|---|--|
| <i>Improve material use</i> | | |
| Reducing demand through material efficiency, longevity, and reuse (cement and steel) | Smarter designs can reduce the amount of steel and cement in a product; products and buildings are designed and built to last longer; products that are no longer used are reallocated for other purposes or recycled (Allwood, 2013). | The demand for steel (metals) and cement is reduced by 30% compared to the demand for those materials under traditional development (see the table's notes). |
| Shifting from virgin material to recycled material (all recyclable materials) | An increase in the use of recycled materials can provide industrial inputs that have lower GHGs than virgin production of those same materials. | The amount of recycled material available is determined endogenously in the waste management sector and used as a substitute for virgin materials. |
| Clinker substitution (cement) | Clinker can be replaced partially by other inputs, such as fly ash and blast furnace slag, which are byproducts of other industrial and energy processes. | The amount of clinker in cement is reduced by 50% for all cement produced (see the table's notes). |
| <i>Improve industrial energy use</i> | | |
| Improve existing processes' energy efficiency | Energy efficiency of existing industrial processes can be improved through better management and process control (e.g., kiln system improvement and heat loss reduction in cement and steel plants) and newer technologies. | Industrial energy intensity is reduced by 30% compared to intensity under traditional development. |
| Electrify low-temperature industrial heat | Low-temperature heat accounts for half of all industrial heat demands. This transformation transitions that heat-to-heat pumps, which run on electricity and can be several times more efficient at providing heat than fossil fuels (Rissman, 2022). | Heat pumps are used to meet 95% of low-temperature industrial heating demands. |
| Transition medium and high-temperature industrial heat to electricity and hydrogen | Medium- and high-temperature heat accounts for half of all industrial heat demands, primarily in metals, cement, and chemicals (Rissman, 2022). This transformation switches that heat to electricity and hydrogen ¹ | Electricity and hydrogen equally replace fossil fuels to meet 95% of medium- and high-temperature industrial heating demands. |

Other GHG abatement

| | | |
|---|---|---|
| F-gas reduction (all industries that emit F-gases) | This transformation includes various actions to reduce F-gas emissions across multiple industries and products—for example, substitutions with less-harmful chemicals, destruction of byproducts, and gas recovery (Sovacool et al., 2021). | F-gas per unit of output is reduced by 85% from industrial processes and product use. |
| N2O abatement in the chemicals industry (adipic and nitric acid production) | This transformation reduces nitrous oxide N2O process emissions from the chemicals industry by destroying the N2O. Applicable abatement measures include ammonia burner (avoid N2O formation), thermal decomposition, or catalytic decomposition (N2O removal). | Ninety percent of N2O emissions from all nitric and adipic acid facilities are abated. |
| Carbon capture and storage (CCS) for steel, cement, chemicals, and plastics | The capture and storage, sequestration, or use of CO2 is key to reducing emissions from hard-to-abate sectors, particularly where production of CO2 is an inherent part of an industrial process (Paltsey et al., 2021; IEA, 2020b). | CCS is implemented for 80% of the steel, cement, chemicals, and plastics with a 90% capture rate. |

Notes: Regarding materials efficiency, the Energy Policy Solutions Simulator () suggests that material efficiency could reduce cement demand by 70% and steel demand by 65% if sales reached a steady state. We have taken a more conservative estimate of the potential as a 30% reduction in demand for these materials compared to baseline, given that demand will increase in LAC as GDP rises and to avoid double counting the impact of recycling as a transformation in Circular Economy.

Regarding F-gas, the EPA’s non-CO2 Greenhouse Gas Data Tool suggests that by 2050, 85% of the emissions from F-gases could be abated. The EPA estimates a net increase in demand for these gases, whereas here it is per unit of demand, making the transformation described here more conservative.

Regarding clinker substitution, the amount of cement that can be replaced depends upon the replacement material. We estimate a potential replacement of 50%, given the range described by Atunes et al. (2021). Such replacement could be possible for all cement, given that reuse of fly ash, one of the most widely used substitutes, remains highly underutilized (Herath et al., 2020).

Table C.3 Industry transformations' technical costs

| Transformation | Technical costs (Labor cost average in 2019 USD) (Negative values indicate avoided costs, i.e., savings) | Notes and data sources |
|--|--|---|
| <i>Improve material use</i> | | |
| Reducing demand through material efficiency, longevity, and reuse (cement and steel) | \$85/ton cement avoided \$370/ton steel avoided | Efficiency in materials presents a savings equivalent to the cost of material use or production that is avoided, less the cost of efforts to implement efficiency and longevity measures. Here, we assume 90% of the cost of materials is realized as savings, with 10% used to achieve reductions. Steel's cost in LAC is estimated at \$410/ton (ITA, undated, adjusted from US prices in January 2019 of \$800/ton) and the cost of cement is estimated at \$94/ton (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2022) |
| Clinker substitution (cement) | \$47/ton of clinker substitution | Leming et al. (2017) estimate that a ton of fly ash costs roughly one-third of a ton of cement, although more fly ash may be needed to replace an equivalent amount of clinker to achieve the same physical properties. We estimate therefore that each ton of substitution results in 50% savings in cement costs, which was approximately \$94/ton in LAC in 2019 (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2022). |
| <i>Improve industrial processes and energy use</i> | | |
| Improve energy efficiency of existing processes | \$10/GJ | Talaei et al. (2019, Table 4) and Talaei et al. (2020, Table 6) estimate the capital cost of increasing energy efficiency of the existing Canadian cement and steel industries, respectively. Average costs across interventions in both industries are CAD\$18/gigajoule (GJ) for cement in and CAD\$44/GJ for steel. |
| Electrify low-temperature industrial heat | \$5/megawatt hour of thermal heat (MWhth) capital cost \$0.90/MWhth non-fuel operations and maintenance | Rissman (2022) estimates that heat pumps have a levelized capital cost of \$8/MW of thermal heat demand compared to other technologies (although this cost premium is rapidly shrinking), and a \$1.50 savings in non-fuel operating expenditure (opex) in the US in 2022 dollars. (No discount rate is documented in this report, and we use levelized costs as presented.) |

| | | |
|--|--|---|
| Transition medium and high-temperature industrial heat to electricity and hydrogen | \$15/MWhth capital cost \$0.90/MWhth non-fuel operations and maintenance | In the absence of other data, we estimate the costs to be triple that of low-temperature heat and equivalent maintenance savings. |
| Clinker substitution (cement) | \$47/ton of clinker substitution | Leming et al. (2017) estimate that a ton of fly ash costs roughly one-third of a ton of cement, although more fly ash may be needed to replace an equivalent amount of clinker to achieve the same physical properties. We estimate therefore that each ton of substitution results in 50% savings in cement costs, which was approximately \$94/ton in LAC in 2019 (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2022). |
| <i>Other GHG abatement</i> | | |
| F-gas reduction (all industries that emit F-Gases) | \$63/tCO ₂ e | The EPA (2019, undated) estimates that approximately 85% abatement of F-gases in Brazil, Argentina, and Venezuela (the three largest emitters in LAC) occur at a cost of less than \$100 per tons of carbon dioxide equivalent (tCO ₂ e) by 2050, in 2010 dollars. We use a weighted average to account for abatement that can occur at no cost and adjust to LAC in 2019 dollars. |
| N ₂ O abatement in chemicals industry (adipic and nitric acid production) | \$13/tCO ₂ e | We use EPA data (2019, Table 5-10) to estimate an undiscounted abatement cost of \$38/ton of adipic acid and \$3/ton of nitric acid approximated (in the US in 2010 dollars). We use an average of these costs and adjust to LAC 2019 USD. |
| CCS for steel, cement, and other industries | \$40/ton CO ₂ (cement) \$50/ton CO ₂ (steel) \$100/ton CO ₂ (chemicals) | The IEA (2020b) estimates that CCS globally adds \$30-50/ton cement, \$50/ton of steel, and \$100/ton of chemicals. |

Table C.4. Non-technical benefits and costs of transforming industry

| Benefit or cost | Technical costs (Labor cost average in 2019 USD) (Positive values indicate benefits and savings) | Notes and data sources |
|---|---|---|
| Avoided health effects from local air pollution from concrete production, excluding industrial energy pollution | \$45/ton cement | Miller et al., (2020, Figure 2) estimate cement externalities of \$80-90/ton in Latin America in 2015 dollars, of which at least 75% stem from local air pollution's health effects. Of this, at least 70% is from process-based (i.e., non-energy) emissions. |
| Avoided health impacts from local air pollution from industrial on-site energy | \$2.47/GJ coal \$0.12/GJ natural gas \$2.47/GJ coke (a coal-based fuel) \$0.31/l diesel \$0.039/l gasoline \$3.05/GJ biomass | We use IMF's fossil-fuel subsidies database (2021) to calculate the avoided air pollution costs of industrial fuel consumption. This database provides costs specific to industry's use of coal and natural gas. We use average values across LAC. We use coal costs for coke, and use costs shown in transport for diesel and gasoline. For biomass, we use average pollution costs across other fuel types. |

Appendix D. Energy Production

The electricity and fuel production sector assesses the demands and emissions associated with both primary and secondary energy, and the costs of transforming them. The electricity sector is modeled differently from other sectors using NemoMod, an energy framework developed by the Stockholm Environmental Institute (Veysey et al., 2023). NemoMod takes as input various drivers and data, including demands, residual generation capacities, capacity and availability factors, capital and operating costs, emission factors, and a series of constraints and generates a least-cost pathway to meet demand contingent on constraints.

Electricity and Fuel Production Historical Data and Projections

Electricity and fuel production emissions are a product of the data in Table D.1. Under Traditional Development, the electricity sector simulates a least-cost future that resembles today's electricity production portfolio. That is, we constrain NemoMod to find a solution subject to the following constraints:

- Fossil fuels will continue to comprise at least the same fraction of electricity generation in the future as they do today.
- No nuclear, hydropower, or biomass generation capacity can be added.

For emissions, electricity and fuel-production parameters are calibrated to match emissions estimates in the electricity sector available at Climate Watch (2022). The set of calibrated parameters comprises technologies' and fuels' efficiency factors.

Table D.1 Data and methods

| Data | Method for historical data | Method for projection under nominal future conditions |
|---|--|--|
| Electricity and fuel demand from each sector (energy/fuel/sector) | Demands are endogenously modeled in each sector as described, based on sector activity, energy intensity, sector-specific fuel mix, and other factors. The demand for electricity in fuel production and for fuels in electricity production are included here, based on the Energy Information Administration (EIA) World Energy Balance (2022). | |
| Electricity production costs by technology | Capital expenditure (capex) is based on IEA estimates (EIA, 2022). Non-fuel opex is assumed to be a fraction of capex, based on proportions to levelized cost of electricity (LCOE) per different technologies using IEA estimates (IEA, 2020c). | The cost of renewable energy production is expected to decline on average by 50% by 2050 but vary by technology. The cost of fossil fuels' energy production remains unchanged. |
| Fuel costs | <p>Demands are endogenously modeled in each sector as described, based on sector activity, energy intensity, sector-specific fuel mix, and other factors. The demand for electricity in fuel production and for fuels in electricity production are included here, based on the Energy Information Administration (EIA) World Energy Balance (2022).</p> <p>Installed and residual capacities are estimated using the World Resources Institute (WRI) Global Database of Power Plants (Byers, 2018) and scaled to match installed capacity totals to scale capacities from the UN Energy Statistics Database (United Nations Statistics Division, 2023) in each country to avoid undercounting available capacity. Minimum shares of production are estimated using IEA monthly electric statistics (2022a). Transmission losses by country are estimated using World Bank Data API (World Bank, 2023)</p> <p>Constant average capacity factors for electricity production for different technologies are estimated using data from the US EIA (EIA, 2015)</p> | NemoMod calculates the least-cost method of meeting future electricity demand subject to two constraints: continued use of fossil fuels; and no new nuclear, hydropower, or biomass capacity |
| Emissions intensity (emissions per unit of energy, by fuel) | Historical emissions intensities of fossil fuels are based on factors found in volume 2, Table 2.2 of the IPCC Guidance for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006) and calibrated between energy consumption data (previous line) and the emissions per fuel type used in each industry (last line). Fuel demands are determined by imports, energy intensity of different industrial activities, and share of fuel type used in different industrial sectors. These shares are estimated using IEA (2022b). | Energy emissions intensities are assumed to remain unchanged in a baseline future. |

| | | |
|---------------------------------|--|--|
| Emissions (MTCO ₂ e) | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration is obtained from Climate Watch (2022). | Total emissions are calculated based on emissions intensities and the quantities of energy consumed (by fuel). |
| | Emissions also include fugitive emissions. | |

Transforming Energy and Fuel Production

We implement three transformations in electricity described in Table D.2. We currently do not transform primary fuel production. Tables D.3 and D.4 show the technical and non-technical costs and benefits.

Table D.2 Transformations to energy and fuel production

| Transformation | Description | Implementation |
|--|--|---|
| Transition to a renewable grid | A renewable grid phases out fossil fuels and meets demand with renewable energy coupled with storage. | This transition constrains NemoMod to produce electricity with 95% renewables, which are limited to solar ($\geq 15\%$), wind ($\geq 15\%$), and geothermal ($\geq 10\%$), along with a variety of storage technologies. No new nuclear, hydropower, or biomass generation capacity can be added. |
| Produce green hydrogen | Green hydrogen is generally produced by electrolysis powered by renewable energy, instead of more typical methods of steam methane reformation or gasification. | All hydrogen is produced through electrolysis. |
| Reduce transmission losses | Electricity grids experience technical and non-technical losses in transmission and distribution from infrastructure and demand characteristics (Jiménez et al., 2014). This transformation mitigates technical losses through upgrades and improvements to the grid, such as replacing transformers and power lines, installing smart grids, and managing reactive power (IEA, 2020). | Investments in transmission infrastructure reduce half of excess losses currently experienced in each country, where excess is defined as losses greater than the 4% experienced in OECD (World Bank, 2023). |
| <i>Flaring fugitive emissions</i> | Energy efficiency of existing industrial processes can be improved through better management and process control (e.g., kiln system improvement and heat loss reduction in cement and steel plants) and newer technologies. | Industrial energy intensity is reduced by 30% compared to intensity under traditional development. |
| Minimizing leaks of fugitive emissions | This transformation uses a variety of technology to identify and repair leaks of fugitive emissions (EPA, 2019). | Eighty percent of leaked fugitive emissions are repaired. |

Table D.3 Energy and fuel production transformations' technical costs

| Transportation | Technical costs (LAC average in 2019 USD) (Negative values indicate avoided costs, i.e., savings) | Notes and data sources |
|-----------------------------------|---|--|
| Transition to a renewable grid | Capex, non-fuel opex, and fuels are calculated endogenously \$2.70/MWh of new transmission | NemoMod calculates the least-cost pathway to a renewable grid, including capital, operations and maintenance, and fuel costs. According to the National Renewable Energy Laboratory (Gorman et al., 2019), the levelized cost of new transmission in the US ranges from \$1/MWh to \$10/MWh. We use an average of \$5/MWh and convert to LAC. |
| Produce green hydrogen | Endogenously calculated in NemoMod based on increased demand for renewable electricity to produce hydrogen. | |
| Reduce transmission losses | Varies by country | The Inter-American Development Bank (Brichettei et al., 2021) estimates the cost between 2020 and 2030 of upgrading each country's grid to meet Sustainable Development Goals (SDGs) to 2030. We use a simple annual average as an approximation of the annual cost of upgrades in each country that would yield reductions in transmission losses. |
| Minimize fugitive emissions leaks | \$20/tCO _{2e} | Studies suggest that fugitive emissions could be abated for less than \$14/tCO _{2e} in the US oil and gas industry through various technologies (ICF International, 2014, Figures A-4 and A-5). We use a conservative estimate, given variations in discount rates, assumptions about methane prices, and so on. |
| Flare fugitive emissions | \$2/tCO _{2e} | We assume flaring will be one-tenth the cost of fixing leaks. |

Table D.4 Benefits and costs of transforming energy

| Benefit or cost | Value (LAC average in 2019 USD) (Positive indicate benefits) | Notes and data sources |
|---|--|--|
| Health benefit of avoided air pollution | \$2.77/GJ coal \$0.99/GJ natural gas \$1.43/GJ oil | We use IMF's fossil-fuel subsidies database (2021) to calculate the avoided air pollution costs of electricity generated by renewables versus coal, natural gas, and oil. (Costs are averaged across LAC, and the average cost of coal and natural gas is used for oil). |

Appendix E. Buildings

This sector includes energy consumed by residential, commercial, and municipal buildings, and other stationary combustion not captured elsewhere. The emissions from this sector depend upon the building stock and population, and the demands for heating, cooling, and other appliances in the building, and the source of energy used. Residential building stock is estimated as a function of population and occupancy rate, which is elastic to GDP per capita. Emissions reductions can be achieved by reducing the amount of energy required in buildings, increasing their energy efficiency, and using cleaner energy sources.

Buildings Baseline Data and Projections

Building emissions are a product of the data in Table E.1. Model parameters are calibrated to match model's emissions estimates in the Buildings sector available at Climate Watch (2022). The set of calibrated parameters comprises efficiency factors of different fuels. Estimated baseline values are modulated to reflect specific national contexts.

Table E.1 Data and methods for historical and baseline projection results

| Data | Method for historical data | Method for baseline |
|---|---|--|
| Demand for heat energy | Heat demand is estimated using IEA's World Energy Balance Highlights (2021). | Using historical data, we currently calculate an elasticity of heat demand per GDP per capita and apply that to a baseline projection of GDP and population. |
| Demand for appliance energy, including cooling | Energy demand is estimated using IEA's World Energy Balance Highlights (2021). The number of households per country is estimated using World Bank's population time series and the Helgi Library Global Socioeconomic Indicators Database (2023) | Using historical data, we calculate an elasticity of appliance energy demand per GDP per capita and apply that to a baseline projection of GDP and population. |
| Energy consumed by energy source | Historical energy consumption data for buildings is available from IEA (2021). Efficiency factors are estimated using IEA's World Energy Balance (2018) | Fractions of energy by source are assumed to remain fixed over time. |
| Emissions intensity (emissions per unit of energy, by fuel) | Historical emissions intensity is calibrated between energy consumption data (previous line) and the emissions per fuel type (last line). | Energy emissions intensities are assumed to remain unchanged in a baseline future. |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration are obtained from Climate Watch (2022) | Total emissions are calculated based on the quantities of energy consumed and each source's emissions intensities. |

Transforming Buildings

Table E.2 shows transformations to reduce emissions from buildings and includes changes to energy efficiency and fuel shifting to heat pumps for heat. Table E.3 shows these transformations' technical costs and benefits. We do not assess non-technical costs or benefits associated with buildings.

Table E.2 Transformations to buildings

| Transformation | Description | Implementation |
|---|---|---|
| Improve building and appliance efficiency | Significant improvements are possible in the building shells and appliances, e.g., through better insulation and energy management. This is applicable both to new buildings and retrofits to existing buildings. | In this transformation, energy demands decline by 50% per capita relative to today. |
| Transition heating to heat pumps | This transformation switches heating to heat pumps, which run on electricity and are several times more efficient at providing heat than fossil fuels (Rissman, 2022). | By 2050, 95% of heat demand is met by heat pumps. |

Table E.3 Building transformations' technical costs

| Transformation | Technical costs (LAC average in 2019 USD) (Negative values indicate avoided costs, i.e., savings) | Notes and data sources |
|---|--|---|
| Improve building and appliance efficiency | \$0.02/kWh saved | Perry et al. (2019, p. 17) estimate the costs in 2018 dollars of reducing building energy demands through a variety of energy-efficiency measures in the US (for purposes of comparing them to the costs of installing solar photovoltaic). We adjust the average cost effectiveness of \$0.04/kWh saved for LAC. |
| Transition heating to heat pumps | \$5/MWhth capital cost, reaching cost parity in 10 years \$0.90/MWhth non-fuel operations and maintenance | We use the same cost data as for low-temperature heat pumps used in industrial energy. Rissman (2022) estimates that heat pumps have a levelized capital cost of \$8/MW of thermal heat demand compared to other technologies, but that this cost premium is shrinking rapidly, with a \$1.50 savings in non-fuel opex in the US in 2022 dollars. (No discount rate is documented in this report, and we use levelized costs as presented). |

Appendix F. Transport

Transportation consists of different categories (or modes) of transportation used to satisfy various demands, and emissions from mobile combustion of fuels are highly dependent on the technologies (e.g., types of vehicles) that use the fuels. Therefore, emission factors for mobile combustion of fuels are contained in the Transportation rather than Energy Fuels subsector.

Modeling Transportation Emissions

Transportation emissions are a product of the data in Table F.1. Model parameters are calibrated to match model's emissions estimates in transportation available at Climate Watch (2022).

Table F.1 Data and methods

| Data | Method for historical data | Method for projections |
|-------------------|--|--|
| Demand for travel | <p>Demand for travel is specified by categories: aviation, heavy duty road, heavy freight rail, heavy passenger rail, human powered, light duty road, public heavy road, regional road, powered bikes, and water borne.</p> <p>Travel demand for public and private transportation is determined using the OECD (2023a) passenger transport database and Oak Ridge National Laboratory (2023).</p> <p>Freight travel demand is determined using the OECD (2023b) Freight Transport database.</p> <p>Shares of transportation across different forms of travel are estimated using data from the US, with adjustments to reflect Latin American conditions.</p> <p>Occupancy rates in private transportation are estimated using the European Environment Agency (2023) Occupancy Rates of Passenger Vehicles database.</p> <p>Freight capacity for different transportation modes is estimated using statistics from the Association of American Railroads (2023) statistics and the US Department of Transportation, Federal Highway Administration (2023), Tables 3-4.</p> | <p>Future demand for travel is projected using elasticities of freight travel and passenger-kilometer demand with respect to GDP per capita.</p> <p>It is assumed at baseline (i.e., no transformations) that as countries develop their mode, shares of transport will converge to those of the US.</p> |
| Fuel mix | <p>Fuel mix is the share of fuel type consumption (e.g., diesel, hydrogen, natural gas, gasoline, and biofuels) by transportation mode (e.g., public and private aviation, bikes, public and private car transportation, heavy freight and heavy regional, rail freight, passenger, and water-borne) using data mostly the US Department of Energy (2022) and Palocz-Andresen (2012).</p> | |

| | | |
|-----------------------------------|---|---|
| Fuel efficiency | <p>Fuel efficiencies for fuels (diesel, hydrogen, natural gas, gasoline, and biofuels) is estimated for public and private transportation, and for heavy freight and heavy regional transportation using data from various sources, including Huo et al., (2012), Ou et al., (2013), Brynolf et al. (2014, p. 90), Delgado et al. (2017, p. 38), Talaiekhosani et al. (2017), Ančić et al. (2018), Chen and Melaina, (2019), To et al. (2020), Liu et al., (2021), Popovich et al. (2021), and Ravigne and Da Costa (2021).</p> <p>Fuel mix is the share of fuel type consumption (e.g., diesel, hydrogen, natural gas, gasoline, and biofuels) by transportation mode (e.g., public and private aviation, bikes, public and private car transportation, heavy freight and heavy regional, rail freight, passenger, and water-borne) using data mostly the US Department of Energy (2022) and Palocz-Andresen (2012).</p> | <p>For road heavyfreight hydrogen efficiency (km per liter), the fuel economy improvement rate is set at 1 % from 2020 to 2050 for fuel cells (Ou et al., 2013; Chen and Melaina, 2019).</p> <p>For road heavyregional diesel efficiency (km per liter), projected values take a long-term 30.64-L(diesel)/100-km estimate (Delgado et al., 2017, p. 38).</p> <p>Railroad efficiencies for freight are estimated using means from Talaiekhosani et al. (2017) and Popovich et al. (2021) as 14.8 L/km (diesel) and 74.8 kWh/km (electric).</p> <p>Passenger railroad efficiencies are estimated as 3.2 L/km (diesel) and 16.2 kWh/km (electric) using Talaiekhosani et al. (2017).</p> <p>For road light biofuel, diesel, gasoline, and hydrogen efficiency (km per liter), projected values adopt the mature technology values (Dincer et al. 2015). Mature technology values are the projected value for 2035. Between 2020-2035, the values are interpolated. For 2035-2050, the values remain the same.</p> |
| Mobile combustion emission factor | Factors are based on IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, volume 4, chapter 3, Tables 3.2.2 (IPPC, 2019) | Factors are assumed to be constant |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration are obtained from Climate Watch (2022). | Total emissions are calculated based on the amount of secondary and primary forest-sequestering emissions, and conversion emissions resulting from converting primary and secondary forests into other land uses. |

Note: For countries not included in the OECD and IEA databases, a statistical imputation model was trained using observations of countries in the database. This model uses GDP and urban and rural population shares of countries to estimate imputed values.

Defining transportation transformations

Tables F.2, F.3, and F.4 describe the transformations modeled to reduced emissions in the Transportation sector, as well as the corresponding technical cost and benefits that result from implementing these transformations. The levels of implementation broadly are derived from recent studies of decarbonizing transport in the region (Papaioannou and Windisch, 2022; Paternina Blanco et al., 2022).

Table F.2 Transportation transformations

| Transformation | Description | Implementation |
|---|---|---|
| <i>Transformations to fuels and vehicles</i> | | |
| Electrify light-duty road transport | Private transportation from internal combustion light-duty vehicles (LDVs) is prevalent in high- and medium-income economies. At a fixed size, electric and partial electric vehicles are more efficient than traditional internal combustion engines and generally are powered by electric grids, shifting emissions to electricity production. Thus, they can be powered by renewable energy. | 70% of LDVs are electric by 2050 |
| Fuel switch medium- and heavy-duty road transport | Similar to light-duty transport, medium- and heavy-duty vehicles (MDVs and HDVs) can be powered by alternative fuels such as electricity and hydrogen, both of which are more efficient than fossil fuels and have zero emissions. Then emissions from these fuels are shifted to fuel production. | By 2050, 70% of medium-duty road transport is powered by electricity and 30% by hydrogen |
| Electrify rail | Electric rail is not uncommon in passenger rail, including advanced, high-speed rail. Increasing its prevalence in passenger and freight rail offsets emissions largely generated by burning diesel. | An additional 25% of rail transport is electrified by 2050, compared to 2025 |
| Fuel switch maritime | Maritime shipping accounts for approximately 3% of emissions globally. Shifting to fuels such as hydrogen in large freight ships and electricity in smaller passenger and local vehicles shifts emissions to fuel production, which can be generated using clean sources such as renewable energy and hydrogen electrolysis. | By 2050, 70% of maritime transport is powered by hydrogen and 30% is powered by electricity |
| Increase transportation energy efficiency | Private vehicles can become more efficient. Increasing the efficiency of vehicles, independent of fuels, reduces the need for energy to satisfy a fixed demand. | By 2050, vehicle energy efficiency increases by 25% over the nominal gains in efficiency in a traditional development future. |

Mode shifting and occupancy

| | | |
|---|---|---|
| Increase occupancy for private vehicles | An increase in vehicle occupancy can achieve the same level of mobility in passenger kilometers while reducing the number of vehicle kilometers traveled. | By 2050, there is a 25% increase in occupancy of private vehicles over current rates, consistent with Grubler et al. (2018). |
| Mode shift local passenger vehicles to others | These transformations shift passenger travel from high-emissions-intensity modes (e.g., private auto) to lower-intensity modes (e.g., bus). Consistent with Vergara et al., (2019), we exclude mode shifts to rail given the sparse rail network in Latin America and the lack of data on expanding the network to accommodate mode shifts. | A total of 30% of passenger travel (passenger-kilometer or pkm) in private vehicles shifts to other modes; 5% of passenger travel shifts to non-motorized modes; 10% shifts to powered bikes and motorcycles; and 15% shifts to transit. This is broadly consistent with trends described by Papaioannou and Windisch (2022). |
| Mode shift regional passenger travel | | A total of 10% of aviation passenger travel and 20% of private vehicle travel (pkms) shifts to bus. |

Source: <https://www.iea.org/articles/changes-in-transport-behaviour-during-the-covid-19-crisis>

Table F.3 Transforming transportation’s technical costs and benefits

| Transformation | Technical costs (LAC average in 2019) | Notes and data sources |
|---------------------------|--|--|
| Electrify LDVs | <p>\$0.039/vehicle-kilometer (vkm) in capital cost, declining over time</p> <p>\$0.012/vkm in maintenance cost (i.e., savings)</p> | <p>These costs reflect the marginal capital and maintenance costs of EVs versus internal combustion engine (ICE) LDVs per km. In the US, light-duty EVs are estimated to have \$12,000 of higher up-front cost (Baik et al., 2019) than traditional LDVs and have \$949/year lower maintenance costs (AAA, 2019) than their ICE counterparts. We approximate that charging infrastructure may involve an additional \$1,000 in capital costs per EV, consistent with data from the US on the costs (Purnazeri, 2022) and deployment of charging stations (Evadoption, 2021). The per-km capital cost shown in the table assumes vehicles are driven 15,000 km/year (Ecola et al., 2008, Ecola et al, 2012, Ecola et al., 2014) and have a 12-year lifespan, consistent with data on vehicle lifetimes in the US (BTS, undated). Then costs are adjusted to 2019 costs for LAC.</p> |
| Fuel switch MDVs and HDVs | <p>\$0.042/vkm + \$0.011/kWh in capital cost, declining over time</p> <p>\$0.02/vkm in maintenance cost (i.e., savings)</p> | <p>Burke et al. (2022) provide marginal capital and maintenance costs of a variety of medium- and heavy-duty battery electric vehicles (BEVs) versus ICEs (Table 19a, p. 50), and the cost of charging infrastructure (p. 22). Using a stated 12-year lifetime, we calculate a simple average of these costs across all vehicle types. Then costs are adjusted to 2019 costs for LAC.</p> |
| Electrify rail | <p>\$0.0013/metric ton per kilometer (mtkm) or pkm in capital cost</p> <p>\$0.0002/mtkm or pkm in maintenance cost (i.e., savings)</p> | <p>Popovich et al. (2021) estimate the capital and maintenance costs of electrifying freight rail. In absence of other information, we assume that electrifying passenger rail will have similar costs per person-km, with a lower mass of passengers compared to freight offset by climate control, lower density, and other variables.</p> |

| | | |
|--|--|--|
| Fuel switch maritime | \$0.0005/mtkm | Carlo et al. (2020) estimate that decarbonizing the maritime industry (using ammonia as the primary fuel) by 2050 will cost roughly \$1 trillion, with 55% of that cost associated with ammonia production and storage and ship-related investments (Krantz et al, 2020). Here, 45% of the cost is associated with hydrogen production, which we account for in energy production. They also estimate a total demand of approximately 500,000-billion-tonnautical miles of demand. We use this data to approximate a cost of fuel switching per MTKM of total goods movement and apply this to LAC. |
| Increase energy efficiency | \$0.88M/PJ, equivalent to \$0.002/vkm for ICE LDVs | The National Research Council (2015) estimates the technical cost and percent fuel economy improvements for LDVs from a wide range of vehicle technologies, including power train, accessories, and vehicle mass. We estimate the average cost per improvement across all technologies and calculate a per-km cost assuming a 12-year vehicle lifetime and 15,000 km/year use. Assuming a fuel economy of 12km/l, we calculate a cost per unit of energy saved and, in the absence of other data, apply this to other modes and fuel types. |
| Increase occupancy for private vehicles | | There are no technical costs associated with increasing private vehicle occupancy; the savings (from avoided costs of transport by auto) are calculated in the system costs. |
| Mode shift freight Mode shift local and regional passenger travel | | The technical costs and savings of freight and passenger mode shifting are a combination of the following: the system cost for providing transport by different modes, the additional cost of expanding infrastructure associated with certain modes of the transport system (e.g., rail transport) to account for added demand; and the cost savings of avoided infrastructure expansion in modes with less demand (e.g., air transport). Quantifying these effects is deeply uncertain, highly localized, and beyond this study's scope. We note, however, that mode shifts could result in a net cost savings, given that the shifts are generally from modes that are infrastructure inefficient (e.g., personal autos) to modes that are more infrastructure efficient (e.g., transit). |

Table F.4 Other benefits and costs of transforming transportation

| Benefit or cost | Value | Notes and data sources |
|---|---|---|
| System cost of passenger transport | \$0.17/vkm for automobiles \$0.017/vkm for motorcycles \$5.20/vkm for bus \$14/vkm for passenger rail \$1067/vkm for aviation | <p>The system cost of providing passenger transport will change as modes and demand change. We approximate this as the cost of vehicle ownership and operating costs. In the US, the capital and operating costs (excluding fuel) by mode are approximately:</p> <ul style="list-style-type: none"> • \$0.31/vkm for automobiles (US DOT National Transportation Statistics, undated, Table 3-17); • \$10/vkm on for buses (averaged across bus types) and \$27/vkm (per passenger car) for passenger rail (averaged across rail types) (US FTA, 2021, Capital Expenses, Operating Expenses, and Metrics tables); • \$2,000/vkm for aviation (calculated from US Department of Transportation National Transportation Statistics' Tables 1-35, 1-40, and 3-20, assuming 10% of costs are for fuel); and • \$0.031/vkm for powered bikes, which we assume are one-tenth the cost of automobiles. <p>Note that different modes may include infrastructure costs to different degrees – the cost of transport infrastructure is largely external to automobile owner/operating costs, whereas it is more likely to be internalized for air transport costs. We adapt these costs to Latin America.</p> |
| System cost of freight transport | \$0.41/mtkm for air \$0.053/mtkm for truck \$0.014/mtkm for rail \$0.01/mtkm for water | <p>We estimate the impact of mode shifting freight based on costs associated with freight transport in the US (\$0.86/mtkm by air; \$0.11/mtkm by truck; 0.03/mtkm by rail, and \$0.02/mtkm by water) and adjust to LAC (US Department of Transportation's National Transportation Statistics, undated, Table 3-21). We exclude fuel costs, assuming they account for 10% of the reported revenue cost. Note that different modes may include infrastructure costs to different degrees – the cost of transport infrastructure is largely external to automobile owner/operating costs, whereas it is more likely to be internalized for air transport costs.</p> |
| Health benefit of avoided air pollution | \$0.039/l gasoline and biofuels \$0.31/l diesel | <p>We use IMF's fossil fuel subsidies database (2021) to estimate the avoided air pollution costs of fossil fuels used for road transport, averaged across LAC.</p> |

| | | |
|---|--------------------------------|---|
| Avoided external crashes and congestion | Crash costs | We use IMF's fossil-fuel subsidies database (2021) to estimate the avoided congestion and crash cost on roads. These costs are provided per liter of fuel and reflect external costs. We use average costs across LAC and calculate total crash costs assuming external crash costs are 75% of the total (Parry et al., 2014). We assume gasoline externalities apply to biofuels and we apply costs to EVs by calculating the cost per unit of energy, adjusting for approximately 4× higher energy efficiency of EVs. |
| | \$0.33/l gasoline and biofuels | |
| \$0.17/l diesel | | |
| \$0.008/kwh electricity | | |
| Congestion costs | | |
| \$0.19/l gasoline and biofuels | | |
| \$0.17/l diesel | | |
| | \$0.005/kwh electricity | |

Appendix G. Waste

The waste sector consists of solid and liquid waste from domestic and industrial sources. The emissions from this sector depend upon the quantity of waste produced, the composition of that waste, and the pathways by which that waste is handled. Correspondingly, emissions reductions can be achieved by reducing the amount of waste produced, altering the waste's composition to have lower emissions potential, improving waste-treatment methods, and returning some portion of the waste stream back into the economy in the form of reused or recycled inputs.

Wastewater

Wastewater is produced by industrial and domestic sources. For industrial sources, wastewater management is defined by various levels of treatment, as Table G.1 describes. These treatments are consistent with the systems and discharge pathways described in the wastewater chapters of the IPCC's 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories and the subsequent 2019 Refinement (Eggleston et al., 2006; Zhongming et al., 2019).

For domestic users, wastewater management consists of sanitation and wastewater treatment. The World Health Organization and United Nations Children's Fund (WHO/UNICEF) Joint Monitoring Program (JMP) for Water Supply, Sanitation, and Hygiene describes a sanitation ladder with five rungs—from (1) open defecation (OD) to (2) unimproved, (3) limited, (4) basic, and (5) safely managed sanitation. Sustainable Development Goal (SDG) 6.2.1a seeks universal access to safely managed sanitation (WHO, 2021), but that means different pathways for urban and rural users, as Table G.2 shows.

In urban settings, safely managed sanitation generally involves sewers that collect household wastewater for subsequent centralized treatment using one of the categories of treatment options described in Table G.1. In rural settings, collection is generally cost prohibitive, so safely managed sanitation includes on-site treatment, e.g., in septic tanks with fecal sludge management. For this study, we have bundled rungs 1 and 2 into an "unimproved" sanitation category and rungs 3 and 4 into an "improved" sanitation category.

Table G.1 Wastewater treatment systems for industrial and domestic urban wastewater

| Treatment system | Description |
|--------------------------------|--|
| No treatment | Wastewater is not treated and is discharged into the environment. |
| Primary treatment | Wastewater first is submitted to preliminary treatment to remove grit, rags, and large solids (e.g., wood or plastic) followed by primary treatment. |
| Secondary treatment | Wastewater is treated at a wastewater treatment plant and includes preliminary, primary, and secondary treatment. |
| Tertiary treatment (aerobic) | Wastewater is treated at an aerobic wastewater treatment plant and includes preliminary, primary, secondary, and tertiary treatment. Sludge is diverted further and managed as solid waste in the solid waste model. |
| Tertiary treatment (anaerobic) | Wastewater is treated at an anaerobic wastewater treatment plant and includes preliminary, primary, secondary, and tertiary treatment. |

Table G.2 Domestic sanitation systems

| Sanitation system | Rural | Urban |
|---------------------------|---|--|
| Unimproved sanitation | Private transportation from internal combustion light-duty vehicles (LDVs) is prevalent in high- and medium-income economies. At a fixed size, electric and partial electric vehicles are more efficient than traditional internal combustion engines and generally are powered by electric grids, shifting emissions to electricity production. Thus, they can be powered by renewable energy. | |
| Improved sanitation | On-site treatment in basic septic tanks or improved latrines, corresponding to the middle two rungs of the JMP sanitation ladder (improved and basic sanitation). | On-site treatment in basic septic tanks or sewered collection without subsequent wastewater treatment, corresponding to the middle two rungs of the JMP sanitation ladder (improved and basic sanitation). |
| Safely managed sanitation | Septic tanks or improved latrines with fecal sludge management (FSM), consistent with the definition of “safely managed sanitation” used by the JMP. | Sewered collection with subsequent centralized treatment at a wastewater treatment facility (see Table B.1), consistent with the definition of “safely managed sanitation” used by the JMP. |

Wastewater historical data and projections

Domestic wastewater is generated per capita and grows with GDP, while industrial wastewater is driven by industrial goods’ production. Then wastewater is allocated to various wastewater management options. The GHG emissions associated with each wastewater option are calculated using emissions factors consistent with the methodology in the 2006 and 2019 IPCC guidelines for national GHG inventories on which the wastewater model is based. Wastewater is estimated to increase under baseline conditions because of projected population and industrial activity increases. Table G.3 lists data sources we used to project wastewater emissions.

Table G.3. Data and methods for historical and baseline projection results

| Data | Method for historical data | Method for projections |
|--|--|---|
| Production of wastewater | Wastewater volumes are estimated using FAO AQUASTAT (2019) database. | Wastewater production volumes are projected in the future using GDP per capita to project volumes of wastewater produced. |
| Fraction of wastewater treated by each pathway | Wastewater volumes across different pathways are estimated using the HydroWASTE (2023) database. | At baseline (i.e., no transformations), shares of treatment across pathways are assumed to remain constant. These shares are modified when transformations are activated in the simulation. |
| Emissions intensity (emissions per unit of wastewater, by pathway) | The N2O Wastewater Treatment Emission Factor is based on IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Tables 6.8A and 6.10C (IPPC, 2019). The Wastewater Treatment Methane Correction Factor is based on IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Table 6.3 (IPPC, 2019). | Emission factors are assumed constant in projections. |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration are obtained from Climate Watch (2022). | |

Notes: For countries not included in the FAO AQUASTAT and HydroWASTE databases, a statistical imputation model was trained using observations of countries in the database. This model uses GDP, urban, and rural population shares of countries to estimate imputed values. A data crosswalk between SiSePuede categories and FAO AQUASTAT and HydroWASTE categories was used to map data inputs.

Transforming wastewater

Defining wastewater transformations

Table G.4 shows transformations to reduce wastewater GHGs. The most aggressive transformation of wastewater management involves reaching universal safe sanitation and tertiary treatment of all wastewater by 2030, consistent with SDGs.

Table G.4. Transformations to wastewater

| Transformation | Description | Implementation |
|----------------------------------|---|---|
| Expand access to safe sanitation | This transformation expands access to safely managed sanitation for both rural and urban populations consistent with the goals in SDG 6.2.1a. | In this transformation, all people are moved to safely managed sanitation pathways by 2030. All rural residents have access to upgraded septic tanks and all urban residents have sewerage with treatment. |
| Treat all wastewater | This transformation treats all industrial and domestic wastewater to at least secondary treatment levels. | By 2030, 100% of wastewater is treated in the following ways. Rural areas: 100% septic tanks Industrial wastewater: 80% tertiary anaerobic treatment, 20% secondary treatment (10% anaerobic, which can be captured), and 10% aerobic) Urban: 30% tertiary aerobic, 30% tertiary anaerobic (which can be captured), 20% secondary aerobic, and 20% secondary anaerobic |
| Capture biogas | This transformation captures biogas from wastewater-treatment facilities for use in the energy sector. | 85% of biogas will be captured by 2050. |

Cost of wastewater transformations

The costs of improving wastewater management are calculated as the difference in technical costs for providing service under a baseline future and an alternative future with better wastewater management. Table G.5 shows each system's technical costs.

Table G.5 Wastewater management's technical costs

| Wastewater management system | Technical costs (LAC average in 2019 USD) | Notes and data sources |
|---|---|--|
| <i>Domestic rural and urban sanitation</i> | | |
| Unimproved sanitation (rural) | \$6.5/capita/year | Domestic sanitation and wastewater treatment costs are based on Tables D.1 and E.1 in Hutton & Varughese (2016), Table A.4.1 in Brichetti et al. (2021), Table 1 in Dodane et al. (2012), and Daudey (2018). Average wastewater produced in LAC is based on Table 4 in Jones et al. (2021). We assume industrial wastewater treatment costs the same as domestic wastewater treatment per quantity of treated water. The full cost of safely managed sanitation in urban settings is the cost of the sanitation system (per capita) and the cost of treating the collected wastewater (per m ³) using one of the wastewater treatment systems. |
| Improved sanitation (rural) | \$68.1/capita/year | |
| Safely managed sanitation (rural) | \$102.1/capita/year | |
| Unimproved sanitation (urban) | \$6.5/capita/year | |
| Improved sanitation (urban) | \$34.1/capita/year | |
| Safely managed sanitation (urban, sanitation only) | \$66.2/capita/year | |
| <i>Industrial and domestic urban wastewater treatment</i> | | |
| No treatment | [\$0.02, 0.06 , 0.30]/m ³ | Domestic sanitation and wastewater treatment costs are based on Tables D.1 and E.1 in Hutton & Varughese (2016), Table A.4.1 in Brichetti et al. (2021), Table 1 in Dodane et al. (2012), and Daudey (2018). Average wastewater produced in LAC is based on Table 4 in Jones et al. (2021). Here, the costs are given for each treatment option in isolation. So, wastewater that receives tertiary treatment will also receive primary and secondary treatment and incur those costs. We assume industrial wastewater treatment costs the same as domestic wastewater treatment per quantity of treated water. The cost of no treatment is the cost of collecting industrial wastewater and dumping it untreated into waterways. We estimated it as one-tenth the cost of sewerage (i.e., safely managed urban sanitation) on a per cubic meter basis. |
| Primary | [\$0.24, 0.64 , 3.10]/m ³ | |
| Secondary (aerobic) | [\$0.40, 0.80 , 3.27]/m ³ | |
| Secondary (anaerobic) | [\$0.40, 0.80 , 3.27]/m ³ | |
| Tertiary (aerobic) | [\$0.80, 1.60 , 6.54]/m ³ | |
| Tertiary (anaerobic) | [\$0.80, 1.60 , 6.54]/m ³ | |
| <i>Biogas capture</i> | \$17/million British thermal units (MBtu) of biogas | IEA (2020f) provides a global average cost of biogas capture at wastewater treatment facilities of \$10.30/MBTU in capex and \$4.30/MBTU in opex, which we convert to 2019 dollars in LAC. |

The non-GHG co-benefits of better wastewater management largely involve avoiding social and environmental costs from poor wastewater management practices, listed in Table G.6. The first group of benefits are associated with improving household sanitation services, consistent with SDG 6.2.1a, the proportion of the population using safely managed sanitation services. For this study, we quantify the benefits of moving households from unimproved and basic sanitation to safely managed sanitation. Benefits of this transformation include seeking less healthcare, avoiding productive time losses from disease, reducing premature mortality, and time savings (Hutton, 2013).

The second group of benefits are associated with treating wastewater, consistent with SDG 6.3.1, the proportion of wastewater safely treated. These benefits are avoiding health, environmental, and productivity costs associated with contaminated water. For this study, we quantify the benefits of wastewater treatment by the amounts of key contaminants for chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD), N, and phosphorous (P) removed by each wastewater treatment system and applying shadow prices to those quantities as Table G.5 shows (Hernández-Sancho et al., 2010; 2015). This does not include the benefits of removing other contaminants (Hernández-Sancho et al., 2015).

The other benefit is the value of methane captured and reused for energy (addressed in the energy sector).

Table G.6 Non-technical benefits and costs of transforming wastewater

| Benefit | Value | Data source |
|--|--|---|
| Improvements in health and productivity from better household sanitation | \$200/year/person transitioned to safe sanitation | The per capita benefits were calculated by dividing the total annual benefit of transitioning from unimproved to improved sanitation in LAC (Table 9) by the total population receiving improved sanitation interventions in LAC (Table 1) in Hutton (2012), adjusted from 2010 to 2019 dollars. The sanitation ladder in Hutton (2012) calculates the benefits of moving from unimproved to improved sanitation, but where the latter term could be extended to include (i.e., safely managed) sanitation options of septic tanks and sewerage with wastewater treatment without affecting the value of benefits. We therefore assume that the benefits roughly apply to transitions from unimproved to safely managed sanitation and improved to safely managed sanitation. |
| Health, environment, and productivity benefits of improved water quality from more and better wastewater treatment | \$51/kg P \$20/kg N \$0.13/kg of chemical oxygen demand (COD) \$0.06/kg of biological oxygen demand (BOD) | Several studies (Hernández-Sancho et al. (2010, 2015) and Antalová and Haluš (2020) calculate the value of BOD, COD, N, and phosphorous (P) removed from wastewater effluent. We use average values and adjust to LAC in 2019. |
| Value of CH ₄ captured and used for energy | Endogenously valued in the energy sector model | |

Solid Waste

Modeling solid waste

Solid waste is generated by consumption. Growth in domestic consumption is driven by GDP per capita, while growth in industrial consumption is driven by production (represented by value added). Solid waste streams are disaggregated by subtype—such as wood, paper, or food—and can be managed in several pathways (see Table G.7), consistent with the systems and discharge pathways described in the waste chapters IPCC’s 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories and the subsequent 2019 refinement. Emissions are calculated using specific emissions factors for each waste stream subtype managed in each system, consistent with the methodology and factors in the IPCC Guidelines.

Table G.7 Solid waste management systems

| Solid waste management | Category | Description |
|---|------------------------------|---|
| Open dump | Unmanaged | Unmanaged discharge of solid waste (e.g., into above-ground piles, holes in the ground, or dumping into natural features such as ravines) |
| Open burning | Unmanaged | Unmanaged combustion of waste (e.g., in open air or open dumps, where emissions are directly released into the air) |
| Landfilling, with methane capture and flaring or reuse composting | Managed landfill | Solid waste collected and deposited in managed sites. This category includes different levels of methane capture and flaring or reuse, the latter of which is an input into the energy sector. |
| | Managed biological treatment | Diverting organic matter for biological treatment, where degradable organic carbon largely is converted to CO ₂ . |
| Anaerobic biogas | Managed biological treatment | Diverting organic matter to anaerobic biogas facilities, which expedites the natural decomposition of organic material without oxygen to generate CH ₄ , which can be recovered for energy and is an input into the energy sector. |
| Recycling | Diversion | Diverting paper, plastics, and other waste materials to reuse in industrial processes. |

Projecting solid waste emissions

Solid waste is estimated to increase under baseline conditions because of projected population and industrial activity increases. Table G.8 lists data sources we used to project solid waste emissions in addition to the 2006 and 2019 IPCC guidelines for national GHG inventories on which the solid waste model is based. A new dataset, the Hub Waste and Circular Economy from the Inter-American Development Bank (<https://hubresiduoscirculares.org/en/>), may be useful in future updates, but was not available in time for the current analysis.

Table G.8 Data and methods for historical and baseline projection results

| Data | Method for historical data | Method for projections |
|--|---|--|
| Production of solid waste | Waste production rates per inhabitant; volumes of waste and recycling rates of waste are obtained from World Bank’s What a Waste database (2023). | Solid waste production volumes are projected in the future using GDP per capita |
| Treatment pathways for solid waste | Treatment pathways for different solid waste types are estimated using World Bank’s What a Waste database (2023). | At baseline (i.e., no transformations) shares of treatment across pathways are assumed to remain constant. These shares are modified when transformations are activated in the simulation. |
| Emissions intensity (emissions per unit of wastewater, by pathway) | | Emission factors are assumed constant in projections. |
| Total emissions | Historical sector emissions are used in the calibration process. Emissions data for calibration are obtained from Climate Watch (2022). | |

Notes: For countries not included in the World Bank database, a statistical imputation model was trained using observations of countries in the database. This model uses GDP, urban, and rural population shares of countries to estimate imputed values. A data crosswalk between SiSePuede categories and World Bank’s categories was used to be able to map data inputs.

Transforming solid waste

Defining solid waste transformations

Table G.9 shows transformations for reducing solid waste GHGs. They include reducing how much solid waste is produced; reducing emissions from waste management vehicles (included in the transportation sector); diverting recyclable and organic material; and improving methane management at landfills.

The most aggressive solid waste management transformation entails ending unmanaged waste disposal (i.e., open dumping and open burning) by 2030 and then by 2050; diverting 100% of organic waste to biological treatments; diverting 100% of recyclable materials to recycling facilities; and capturing and achieving 85% methane recovery and reuse in landfills. We define less aggressive transformations as the fraction of these targets reached by the specified year and, in the case of unmanaged solid waste disposal, we extrapolate the rate of change out to the year 2050.

Table G.9 Transformations affecting solid waste

| Transformation | Description | Implementation |
|--|---|---|
| Reducing how much waste is produced | Households' food waste and other waste is reduced. Domestic demand for food also decreases as a result and affects agricultural production and exports in the AFOLU sector. | The maximum implementation of waste reduction involves reducing consumers' food waste by 50% by 2030 and by 75% by 2050, ² and reducing other waste by 10% by 2030 and 25% by 2050. Lower implementation levels yield smaller reductions in these time frames. |
| Increasing waste collection | Increasing the amount of solid waste that is collected and safely managed, with the aim of ending open dumping and open burning | The maximum implementation of this transformation involves collecting 100% of waste (i.e., ending open dumping and open burning) by 2030. Lower implementation levels yield less collection by 2030. |
| Diverting more recyclables | Increasing the fraction of recyclable material that is diverted from the waste stream, recycled, and used in IPPU where it offsets producing virgin materials. | The maximum implementation involves diverting 100% of recyclable materials by 2050. Lower levels of implementation involve less diversion by 2050. |
| Diverting more organic waste | Increasing the fraction of organic material that is diverted from the traditional waste stream to managed biological treatment. | The maximum implementation involves diverting 100% of organic waste by 2050. Lower levels of implementation have less diversion by 2050. |
| Improving landfills gas capture and flaring or reuse | Increasing the fraction of methane captured and flaring or reuse. Captured energy is input into the energy sector. | The most aggressive implementation involves capturing and achieving 85% methane recovery and reuse in landfills. Lower implementation levels yield less capture by 2050. |

² This transformation targets household food waste, which we estimate as 62 kg per capita per year in Latin America (233 kg per capita per year in total waste [FAO, 2016], 27% of which occurs in the consumption phase [UNEP 2018]). This is consistent with individual city or regional case studies, which report 34-95 kg of food waste per capita per year at the household level (UNEP, 2019).

These transformations are consistent with the United Nations Environmental Program (UNEP’s) Latin America Waste Outlook (Table 6.8, 2015), which identifies several global solid waste management goals and describes how they relate to SDGs:

- Ensure access for all to adequate, safe, and affordable solid waste collection services.
- Eliminate uncontrolled dumping and open burning.
- Ensure the sustainable and environmentally sound management of all waste, particularly hazardous wastes.
 - Substantially reduce waste generation through prevention and the 3Rs (reduce, reuse, and recycle), thereby creating green jobs.
 - Halve global per capita food waste at the retail and consumer levels and reduce food losses in the supply chain.

Costs of solid waste transformations

The cost of waste minimization is calculated per ton of waste avoided (see Table G.10 for costs on different types of waste). Table G.10 also shows transformations to reduce solid waste GHGs. These transformations include reducing how much solid waste is produced; reducing emissions from waste management vehicles (included in the transportation sector); diverting recyclable and organic material; and improving methane management at landfills.

The most aggressive transformation of solid waste management involves ending unmanaged waste disposal (i.e., open dumping and open burning) by 2030 and then by 2050; additionally diverting 100% of organic waste to biological treatments; diverting 100% of recyclable materials to recycling facilities; and capturing and achieving 85% methane recovery and reuse in landfills. We define less aggressive transformations as the fraction of these targets reached by the specified year and, in the case of unmanaged solid waste disposal, extrapolate the rate of change out to the year 2050. Table G.11 shows each system’s technical costs.

Table G.10 Waste reduction’s technical costs

| Waste Reduction | Annualized technical costs | Data sources and notes |
|--|---------------------------------|--|
| Retail and consumer food Waste reduction | \$100/ton of food waste avoided | Costs are based on the average per-ton costs of consumer-facing actions to reduce food waste in the US found in the appendix of ReFED (2016), adjusted to LAC. |

Table G.11 Solid waste management’s technical costs

| Waste management | Technical costs | Data sources |
|------------------|---|--|
| Collection | \$86/ton of waste | World Bank (2012) provides costs for collecting and managing waste for countries of different income groups. We use a LAC average to average costs between lower-middle and upper-middle income countries. We assume 70% of recycled and open dumped waste in LAC is collected, and 100% of waste in other management systems is collected. |
| Management | \$10/ton—open dumping | |
| | \$57/ton—managed landfill | |
| | \$61/ton—composting | |
| | \$86/ton—anaerobic biogas | |
| | \$72/ton—recycling | |
| | \$70/ton—incineration | |
| Energy recovery | \$170/ton waste feedstock (incineration) \$500/ton of gas recovered (landfills, anaerobic digesters) | For management without energy recovery, we use average costs across the lower-middle and upper-middle income tiers. The recycling cost includes the cost of separation and materials recovery. The processing and manufacturing costs are included in the value of recyclables (discussed in benefits) and estimated from the EPA’s documentation of paper recycling costs (EPA, 2019). Cost for energy recovery is based on IEA estimates (2020f). |

Note: The technical costs and baseline service coverage in our study broadly align with the findings in Correal et al. (2023), which provides comprehensive data on municipal solid waste generation, collection, and final destination in LAC countries, as well as an assessment of the resource gap needed to fulfill SDGs related to the region’s solid waste management by 2030.

Benefits of solid waste transformations

The GHG benefits from improving solid waste management are calculated endogenously in the model based on the amount of waste produced and fraction of waste handled by each management system in a baseline versus alternative future. Avoided emissions are valued by the social cost of carbon. Emissions benefits of using recycled materials instead of virgin materials are calculated in the IPPU sector, emissions benefits of lower food production requirements from avoided reduced food waste are calculated in the AFOLU sector, and emissions benefits of methane capture and use are calculated in the energy sector.

The non-GHG benefits of better solid waste management involve expenditure savings from reduced waste, avoided social and environmental externalities of poor solid waste management practices, and the value of byproducts from better solid waste management, including recyclable materials, compost, sludge (valued in the wastewater sector), and energy (valued in the energy sector). These benefits are listed in Table G.12.

Table G.11 Solid waste management’s technical costs

| Benefit category | Technical costs | Data sources |
|---|---|--|
| Value of waste avoided | \$700/ton of food waste avoided | Food waste occurs across food types, and without specific information on the types of food that are wasted and have recovery potential in the supply chain, we use the average price of food across all product types. |
| Reduced environmental and health impacts from open dumps to managed systems | \$115/ton of unmanaged waste transitioned to managed pathways | Wilson et al. (2015) suggest a “conservative” cost of \$20-50/capita/year from unmanaged waste and describe an average waste of 220 kg/capita/year among the poorest. We calculate costs assuming \$20/capita and 0.22 ton/capita, adjusted from 2015 to 2019 dollars. |
| Value of CH ₄ captured in landfills and used for energy | Endogenously assessed in the energy model | |

Benefits of solid waste transformations

The GHG benefits from improving solid waste management are calculated endogenously in the model based on the amount of waste produced and fraction of waste handled by each management system in a baseline versus alternative future. Avoided emissions are valued by the social cost of carbon. Emissions benefits of using recycled materials instead of virgin materials are calculated in the IPPU sector, emissions benefits of lower food production requirements from avoided reduced food waste are calculated in the AFOLU sector, and emissions benefits of methane capture and use are calculated in the energy sector.

The non-GHG benefits of better solid waste management involve expenditure savings from reduced waste, avoided social and environmental externalities of poor solid waste management practices, and the value of byproducts from better solid waste management, including recyclable materials, compost, sludge (valued in the wastewater sector), and energy (valued in the energy sector). These benefits are listed in Table G.12.

References

- Allwood, J. M. 2013. 1986. "Transitions to material efficiency in the UK steel economy." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371: 20110577.
- AAA. 2019. "Your driving costs: How much are you really paying to drive?"
- Ančić, I., Vladimir, N., and Luttenberger, L.R. 2018. "Energy efficiency of ro-ro passenger ships with integrated power systems." *Ocean Engineering*, 166:350-357.
- Antalová, V., & Halus, S.S.M. 2020. Estimating shadow prices of wastewater pollutants in Slovakia. *Ekonomický časopis [Journal of Economics]*, 68(2): 134-146.
- Antunes, M., Santos, R.L., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R.B., and Colaço, R. 2021. "Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A Critical Review." *Materials* 15(1): 209.
- Association of American Railroads. 2023. Facts and Figures. Retrieved July 4, 2023. <https://www.aar.org/facts-figures>
- Baik, Y., Hensley, R., Hertzke, P., and Knupfer, S. 2019. "Making electric vehicles profitable." *McKinsey.com* March 8, 2019. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/making-electric-vehicles-profitable>
- Brichetti, J.P., Mastronardi, L., Rivas, M.E., Serebrisky, T., and Solís, B. 2021. "The infrastructure gap in Latin America and the Caribbean: Investment needed through 2030 to meet the sustainable development goals." *Inter-American Development Bank. Infrastructure and Energy Sector. VII. Serie. IDB-MG-962*
- Brynolf, S., Fridell, E., and Andersson, K. 2014. Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of Cleaner Production* 74:86-95.
- BTS (Bureau of Transportation Statistics). Average Age of Automobiles and Trucks in Operation in the United States (undated). <https://www.bts.gov/content/average-age-automobiles-and-trucks-operation-united-states>
- Burke, A., Miller, M., Sinha, A., and Fulton, L. 2022. Evaluation of the Economics of Battery-Electric and Fuel Cell Trucks and Buses: Methods, Issues, and Results. University of California, Davis research report.
- Byers, L., Friedrich, J., Hennig, R., Kressig, A., Li, X., McCormick, C. O. L. I. N., and Valeri, L.M. 2018. A global database of power plants. *World Resources Institute* 18.
- Carlo, R., Marc, B.J., de la Fuente Santiago, S., Smith, T., and Sogaard, K. 2020. Aggregate Investment for the Decarbonisation of the Shipping Industry. London, UK: UMAS. <https://www.globalmaritimeforum.org/content/2020/01/Aggregate-investment-for-the-decarbonisation-of-the-shipping-industry.pdf>
- Chakraborty, D., Ladha, J.K., Rana, D.S., Jat, M.L., Gathala, M.K., Yadav, S., et al. 2017. "A global analysis of alternative tillage and crop establishment practices for economically and

-
- environmentally efficient rice production.” *Scientific Reports* 7(1): 1-11.
- Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., Loaiza, S., Correa, F., Isthitani, M., Loboguerrero, A.M., et al. 2018. "Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in Latin America and the Caribbean: A review on the transition from ideality to reality." *Sustainability* 10(3): 671.
- Climate Watch. 2022. Washington, DC: World Resources Institute. www.climatewatchdata.org
- Correal, M., Rihm, A., and Zambrano, M. 2023. "Sostenibilidad financiera de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe." Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. Serie. IDB - TN - 2663
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S., and Turner, R.K. 2014. "Changes in the global value of ecosystem services." *Global Environmental Change* 26: 152-158.
- Cui, D., Liang, S., Wang, D., and Liu, Z. 2021. "A 1 km global dataset of historical (1979–2013) and future (2020–2100) köppen–geiger climate classification and bioclimatic variables.” *Earth System Science Data* 13(11): 5087–5114.
- Daudey, Loïc. 2018. "The cost of urban sanitation solutions: a literature review." *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 8(2): 176-195.
- Delgado, O., Rodriguez, F., and Muncrief, R. 2017. "Fuel efficiency technology in European-heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020-2030 time frame.” *Communications* 49(30): 847129-848102.
- Dincer, I., Hogerwaard, J., & Zamfirescu, C. 2015. *Clean Rail Transportation Options*. Springer.
- Dudley, B. 2019. "BP statistical review of world energy 2016.” *British Petroleum Statistical Review of World Energy*. UK: Pureprint Group Limited.
- Ecola, L., and Wachs, M. 2012. "Exploring the relationship between travel demand and economic growth." *National Academy of Sciences*.
- Ecola, L., Rohr, C., Zmud, J., Kuhnimhof, T., and Phleps, P. 2014. *The Future of Driving in Developing Countries*. Santa Monica, CA: RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR636.html.
- Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan: IGES.
- EIA (Energy Information Administration). 2022. *Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2022*. March 2022.
- EIA. 2015. *Electric Generator Capacity Factors Vary Widely Across the World*. September 2015.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2019. *Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emission*

Projections & Marginal Abatement Cost Analysis: Methodology Documentation.
EPA-430-R-19-012. September 2019.

- EPA. Non-CO2 Greenhouse Gas Data Tool (undated). <https://cfpub.epa.gov/ghgdata/nonco2/>
- ESMAP. 2020. Global Photovoltaic Power Potential by Country. Washington, DC: World Bank.
- European Environment Agency. 2023. Occupancy Rates of Passenger Vehicles. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/occupancy-rates-of-passenger-vehicles>
- Evadoption, 2021. Charging Stations by State. <https://evadoption.com/ev-charging-stations-statistics/charging-stations-by-state/>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2014. Global Land Cover—Share (glc-share). /
- FAO. 2016. Food Losses and Wastes in Latin America and the Caribbean. <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/en/>
- FAO. 2022. Conservation Agriculture. <https://www.fao.org/3/cb8350en/cb8350en.pdf>
- FAO. Sustainable Development Goals Data Portal: Percentage of Food Loss by Region, 2016–2020 (undated).
- FAO. 2023a. FAOStat—Value of Agricultural Production. United Nations Food and Agriculture Organization. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QV>
- FAO. 2023b. Statistical Standard Series. Units of Measure Version 2. United Nations Food and Agriculture Organization.
- FAO. 2023c. Production Database. United Nations Food and Agriculture Organization. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- FAO. 2023d. Trade Database. United Nations Food and Agriculture Organization. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>.
- FAO. 2023e. Land Use Database. United Nations Food and Agriculture Organization. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>.
- FAO. 2023f. Land Cover Database. United Nations Food and Agriculture Organization. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Extracted from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/LC>.
- FAO. 2023g. Emissions Database. United Nations Food and Agriculture Organization. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Extracted from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/GT>. Fargione, J., Haase, D.L., Burney, O.T., Kildisheva, O.A., Edge, G., Cook-Patton, S.C., Chapman, T., et al. 2021. "Challenges to the reforestation pipeline in the United States." *Frontiers in Forests and Global Change* 4: 629198.
- Flanagan, K., Robertson, K., and Hanson, C. 2019. Reducing Food Loss and Waste: Setting a

-
- Global Action Agenda. Washington, DC: World Research Institute.
- Frank, S., Beach, R., Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Mosnier, A., Hasegawa, T., Creason, J., Ragnauth, S., and Obersteiner, M. 2018. "Structural change as a key component for agricultural non-CO2 mitigation efforts." *Nature Communications* 9(1): 1060.
- Good, A.G., and Beatty, P.H. 2011. "Fertilizing nature: a tragedy of excess in the commons." *PLoS Biology* 9(8): e1001124.
- Gordon, D., Reuland, F., Jacob, D.J., Worden, J.R., Shindell, D.T., and Dyson, M. 2023. "Evaluating net life-cycle greenhouse gas emissions intensities from gas and coal at varying methane leakage rates." *Environmental Research Letters* no. 8 (2023): 084008.
- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D.L., Rao, N.D., et al. 2018. "A low energy demand scenario for meeting the 1.5 C target and sustainable development goals without negative emission technologies." *Nature Energy* 3(6): 515-527.
- Hanson, C., Lipinski, B., Nichols-Vinueza, A., Antonioli, V., Espinoza, L., Kenny, S., Sturzenegger, G., and Espinola, N. 2022. *A Playbook for Reducing Food Loss and Waste in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank. Water and Sanitation Division. Series IDB - PB - 36 2
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D.W., and Setunge, S. 2020. "Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review." *Construction and Building Materials* 258: 120606.
- Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M., and Sala-Garrido, R. 2010. Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain. *Science of the Total Environment*, 408(4): 953-957.
- Hernández-Sancho, F., Lamizana-Diallo, B., Mateo-Sagasta, J., and Qadir, M. 2015. *Economic Valuation of Wastewater: The Cost of Action and the Cost of No Action*. United Nations Environment Programme (UNEP).
- Heinrich, V.H.A., Dalagnol, R., Cassol, H.L.G., et al. 2021. "Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change." *Nature Communications* 12: 1785. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>
- Hoffmann, C., Van Hoey, M., and Zeumer, B. 2020. *Decarbonization Challenge for Steel*. McKinsey. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Metals%20and%20Mining/Our%20Insights/Decarbonization%20challenge%20for%20steel/Decarbonization-challenge-for-steel.pdf>
- Holechek, J.L. 1988. "An approach for setting the stocking rate." *Rangelands Archives* 10(1): 10-14.
- Huo, H., He, K., Wang, M., and Yao, Z. 2012. "Vehicle technologies, fuel-economy policies, and fuel-consumption rates of Chinese vehicles." *Energy Policy* 43:30-36.
- Hutton, G., and Varughese, M. 2016. "The costs of meeting the 2030 sustainable development

goal targets on drinking water, sanitation, and hygiene." The Water and Sanitation Program.

- Hutton, G. 2012. Global Costs and Benefits of Drinking-Water Supply and Sanitation Interventions to Reach the MDG Target and Universal Coverage. Report WHO/HSE/W-SH/12.01. World Health Organization.
- Hutton, G. 2013. "Global costs and benefits of reaching universal coverage of sanitation and drinking-water supply." *Journal of Water and Health* 11(1): 1-12.
- ICF International. 2014. "Economic analysis of methane emission reduction opportunities in the US onshore oil and natural gas industries."
- IEA (International Energy Agency). 2018. World Energy Balances Highlights. IEA. Licence: Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights>
- IEA. 2019. Levelised Cost of CO2 Capture by Sector and Initial CO2 Concentration. Paris: IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019>
- IEA. 2020a. Projected Costs of Generating Electricity 2020. Paris: IEA. License: CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- IEA. 2020b. CCUS in Clean Energy Transitions. Paris: IEA. License: CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>, License: CC BY 4.0
- IEA. 2020c. Levelised Cost of Electricity Calculator. Paris: IEA.
- IEA. 2020d. Iron and Steel Technology Roadmap Towards More Sustainable Steelmaking.
- IEA. 2020e. Sustainable Recovery: World Energy Outlook Special Report.
- IEA. 2020f. Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for Organic Growth. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>
- IEA. 2021. World Energy Balances Highlights. IEA. Licence: Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0.
- IEA. 2022a. Monthly Electricity Statistics. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/monthly-electricity-statistics#monthly-electricity-statistics>
- IEA. 2022b. Energy End-Uses and Efficiency Indicators.
- IFA. 2023. Databases. International Fertilizer Association. License: CC BY-NC-SA 3.0. <https://www.ifastat.org/databases>.
- IMF (International Monetary Fund). 2021. Fossil Fuel Subsidies by Country and Fuel Database. <https://www.imf.org/en/Topics/climate-change/energy-subsidies>
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the

-
- National Greenhouse Gas Inventories Programme. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds). Japan: IGES.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Sherman-au, and S. Federici. (eds). Switzerland: IPCC.
- ITA (International Trade Administration). U.S. Steel Executive Summary. Data visualization (undated).
- Jiménez, R., Serebrisky, T., and Mercado, J. 2014. Sizing Electricity Losses in Transmission and Distribution Systems in Latin America and the Caribbean. Inter-American Development Bank.
- Kassam, A., Friedrich, T., and Derpsch, R. 2019. "Global spread of conservation agriculture." *International Journal of Environmental Studies* 76(1): 29-51.
- Komarek, A.M., Dunston, S., Enahoro, D., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Mason-D'Croz, D., Rich, K.M. et al. 2021. "Income, consumer preferences, and the future of livestock-derived food demand." *Global Environmental Change* 70: 102343.
- Krantz, R., Søgaard, K., and Smith, T. 2020. "The scale of investment needed to decarbonize international shipping." *Getting to Zero Coalition Insight Series* January: 3-6.
- Leming et al. 2017. Fly Ash in Concrete: An Overview of Benefits and Quantities Needed for Use in Portland Cement Concrete in North Carolina, South Carolina, and Virginia 2015 Report with 2017 Update Report. International Trade Association.
- Liu, F., Mauzerall, D.L., Zhao, F., and Hao, H. 2021. "Deployment of fuel cell vehicles in China: Greenhouse gas emission reductions from converting the heavy-duty truck from diesel and natural gas to hydrogen." *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34): 17982-17997.
- Miller, S.A., and Moore, F.C. 2020. "Climate and health damages from global concrete production." *Nature Climate Change* 10(5): 439-443.
- Minx, J.C., Lamb, W.F., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Crippa, M., Döbbeling, N., et al. 2021. "A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019." *Earth System Science Data* 13(11): 5213-5252.
- National Research Council. 2015. Cost, Effectiveness, and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/21744>.
- Oak Ridge National Laboratory. 2023. National Household Travel Survey: Person Miles Traveled. <https://nhts.ornl.gov/person-miles>
- OECD. 2023a. Passenger Transport Database. <https://data.oecd.org/transport/passenger-trans->

port.htm#indicator-chart

OECD. 2023b. Freight Transport Database. <https://www.oecd.org/statistics/data-collection/transport.htm>

Pagiola, S., Ramírez, E., Gobbi, J., De Haan, C., Ibrahim, M., Murgueitio, E., and Ruíz, J.P. 2007. "Paying for the environmental services of silvopastoral practices in Nicaragua." *Ecological Economics* 64(2): 374-385.

Paltsev, S., Morris, J., Kheshgi, H., and Herzog, H. 2021. "Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation." *Applied Energy* 300: 117322.

Papaioannou, D., and Windisch, E. 2022. *Decarbonising Transport in Latin American Cities: Assessing Scenarios to 2050*. Inter-American Development Bank. <https://publications.iadb.org/en/decarbonising-transport-latin-american-cities-assessing-scenarios-2050>

Paternina Blanco, J., Windisch, E., Perkins, S., Ito, A., and Leape, J. 2022. *Decarbonising Transport in Latin American Cities: A Review of Policies and Key Challenges*. Inter-American Development Bank. <https://publications.iadb.org/en/decarbonising-transport-latin-american-cities-review-policies-and-key-challenges>

Perry, C., Misuriello, H., and Amann, J. 2019. "Solar PV and Energy Efficiency in Residential Building Codes." ACEEE white paper. April 2019,

Poggio, L., de Sousa, L.M., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B.M., Kempen, B., Ribeiro, E., and Rossiter, D. 2021. "Soilgrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty." *SOIL* 7(1): 217-240.

Popkin, B.M., and Reardon, T. 2018. "Obesity and the food system transformation in Latin America." *Obesity Reviews* 19(8): 1028-1064.

Popovich, N.D., Rajagopal, D., Tasar, E., and Phadke, A. 2021. "Economic, environmental and grid-resilience benefits of converting diesel trains to battery-electric." *Nature Energy* 6(11): 1017-1025.

Pournazeri, S. 2022. *How Much Does Electric Vehicle Charging Infrastructure Actually Cost?* ICF International.

Ravigne, E., and Da Costa, P. 2021. "Economic and environmental performances of natural gas for heavy trucks: A case study on the French automotive industry supply chain." *Energy Policy* 149: 112019.

ReFED, A. 2016. *A Roadmap to Reduce US Food Waste by 20 Percent*. New York, NY: Rockefeller Foundation.

Rissman, J. 2022. *Decarbonizing Low-Temperature Industrial Heat in the U.S*. Energy Innovation Policy & Technology.

Sadri, J., and Suen, C.-Y. 2006. "A genetic binary particle swarm optimization model." 2006

-
- IEEE International Conference on Evolutionary Computation. IEEE, pp. 656-663.
- SHP (Soil Health Partnership), EDF (Environmental Defense Fund), and Isom, K.C. 2021. Conservation's Impact on the Farm Bottom Line. <https://www.soilhealthpartnership.org/wp-content/uploads/2021/02/Conservation-Impact-On-Farm-Bottom-Line-2021.pdf>
- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (Brazil). 2022. "Cement price in selected countries in Latin America from 2019 to 2021 (in U.S. dollars per metric ton)" [graph]. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1232594/latin-america-cement-price-country/>
- Sovacool, B.K., Griffiths, S., Kim, J., and Bazilian, M. 2021. "Climate change and industrial F-gases: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141: 110759.
- Sperow, M. 2020. "What might it cost to increase soil organic carbon using no-till on US cropland?" *Carbon Balance and Management*, 15(1): 1-13.
- Springmann, M., Godfray, H.C.J., Rayner, M., and Scarborough, P. 2016. "Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(15): 4146-4151.
- Springmann, M., Mason-D'Croz, D., Robinson, S., Wiebe, K., Godfray, H.C.J., Rayner, M., and Scarborough, P. 2017. "Mitigation potential and global health impacts from emissions pricing of food commodities." *Nature Climate Change* 7(1): 69-74.
- Stockholm Environmental Institute (2023). NEMO: Next Energy Modeling system for Optimization [documentation]. <https://sei-international.github.io/NemoMod.jl/stable/>
- Talaei, A., Pier, D., Iyer, A.V., Ahiduzzaman, M., and Kumar, A. 2019. "Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry." *Energy* 170: 1051-1066.
- Talaei, A., Ahiduzzaman, M., Davis, M., Gemechu, E., and Kumar, A. 2020. "Potential for energy efficiency improvement and greenhouse gas mitigation in Canada's iron and steel industry." *Energy Efficiency* 13(6): 1213-1243.
- Talaiekhosani, A., Ghaffarpasand, O., Talaei, M.R., Neshat, N., and Eydivandi, B. 2017. "Evaluation of emission inventory of air pollutants from railroad and air transportation in Isfahan metropolitan in 2016." *Journal of Air Pollution and Health* 2(1).
- Taye, F.A., Folkersen, M.V., Fleming, C.M., Buckwell, A., Mackey, B., Diwakar, K.C., Le, D., Hasan, S., and Saint Ange, C. 2021. "The economic values of global forest ecosystem services: A meta-analysis." *Ecological Economics* 189: 107145.
- Telles, T.S., Reydon, B.P., and Maia, A.G. 2018. "Effects of no-tillage on agricultural land values in Brazil." *Land Use Policy* 76: 124-129.

-
- Timmer, M.P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R. and de Vries, G.J. 2015. "An Illustrated User Guide to the World Input–Output Database: the Case of Global Automotive Production" *Review of International Economics* 23(3): 575–605.
- To, W.M., Lee, P.K.C., and Yu, B.T.W. 2020. "Sustainability assessment of an urban rail system—The case of Hong Kong." *Journal of Cleaner Production* 253: 119961. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119961>
- Tost, M., Murguía, D., Hitch, M., Lutter, S., Luckeneder, S., Feiel, S., and Moser, P. 2020. "Ecosystem services costs of metal mining and pressures on biomes." *The Extractive Industries and Society* 7(1): 79-86.
- UNEP (United Nations Environmental Programme). 2018. *Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean*. UNEP.
- UNEP. 2019. *Food Waste Index Report*. UNEP.
- United Nations Statistics Division. 2023. *Energy Statistics Database—Electricity—Total Net Installed Capacity of Electric Power Plants*. <http://data.un.org/Data.aspx?d=EDATA&f=c-mID%3AEC>
- United States Department of Transportation, National Transportation Statistics. Bureau of Transportation Statistics (undated).
- US Department of Transportation Federal Highway Administration. 2023. Table 3-4: Average Payload and Empty Weight of Trucks on the Highway System. <https://ops.fhwa.dot.gov/freight/>
- United States FTA (Federal Transit Administration). 2021. *National Transit Database 2021*. <https://www.transit.dot.gov/ntd>
- Vergara, W., Fenhann, J.V., and Santos da Silva, S.R. 2021. *The Opportunity, Cost, and Benefits of the Coupled Decarbonization of the Power and Transport Sectors in Latin America and the Caribbean*. Panama: UNEP, Office for Latin America and the Caribbean.
- Wang, D., Tan, D., and Liu, L. 2018. "Particle swarm optimization algorithm: an overview." *Soft Computing* 22: 387-408.
- West, P.C., Gerber, J.S., Engstrom, P.M., Mueller, N.D., Brauman, K.A., Carlson, K.M., Cassidy, E.Y., et al. 2017. "Leverage points for improving global food security and the environment." *Science* 345(6194): 325-328.
- Williams, G.W., and Anderson, D.P. 2020. "The Latin American livestock industry: growth and challenges." *Choices* 34(316-2020-617): 1-11.
- Wilson, D.C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero, A., Velis, K., et al. 2015. *Global Waste Management Outlook*. UNEP.
- World Bank. *Electric Power Transmission and Distribution Losses (% of output)—OECD members* (undated). <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?locations=OE>

WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene. 2021. Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000-2020: Five Years into the SDGs. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240030848>

World Steel Association. Energy Use in the Steel Industry. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf> (undated).

¿El desarrollo y la descarbonización son objetivos contradictorios o complementarios? En este informe exploramos cómo América Latina y el Caribe pueden mejorar los resultados socioeconómicos y de desarrollo y, al mismo tiempo, alcanzar emisiones netas cero de gases de efecto invernadero para 2050. Específicamente, presentamos SiSePuede, un conjunto de herramientas de modelado de descarbonización de código abierto que evalúa los costos, beneficios y reducciones de emisiones de las acciones de descarbonización en toda la economía. Descubrimos que a través de maximizar la acción climática es posible alcanzar emisiones netas cero en la región antes de 2050 y generar 2,7 billones (millones de millones) de dólares netos en beneficios en comparación con el desarrollo más tradicional. Los beneficios incluyen enormes ahorros en costos de combustible; costos evitados por la reducción de la contaminación del aire, la congestión y los accidentes automovilísticos; y el valor de los servicios ecosistémicos de los bosques. A pesar de que existen muchos caminos hacia las emisiones netas cero, tres acciones son fundamentales: producir electricidad con energías renovables, electrificar el transporte y proteger y restaurar los bosques deteniendo la deforestación y cambiando los patrones de producción de alimentos. Las estrategias que abarcan a toda la economía y que implementan estas acciones a escala pueden reducir drásticamente las emisiones y generar enormes beneficios para la región incluso en medio de profundas incertidumbres, con una mediana de 1 billón de dólares en beneficios netos en todos los escenarios. Estos beneficios se distribuyen de manera desigual entre sectores y actores, y a lo largo del tiempo, por lo que lograrlos y garantizar una transición justa hacia cero emisiones netas requiere que los gobiernos superen importantes barreras financieras, regulatorias, de infraestructura y de otro tipo. Cada país debe adaptar su propia estrategia para abordar los objetivos de desarrollo y emisiones en función de las prioridades, capacidades, recursos y capacidad técnica locales. SiSePuede proporciona una base analítica sólida para respaldar estos esfuerzos.