

COSTOS Y BENEFICIOS DE LA DESCARBONIZACIÓN DE LA ECONOMÍA DE COSTA RICA

Evaluación del
Plan Nacional de Descarbonización
bajo incertidumbre



David G. Groves, James Syme, Edmundo Molina-Perez,
Carlos Calvo, Luis Víctor-Gallardo, Guido Godinez-Zamora,
Jairo Quirós-Tortós, Felipe De León, Andrea Meza Murillo,
Valentina Saavedra Gómez, Adrien Vogt-Schilb

COAUTORES



EN APOYO A



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

Costos y beneficios de la descarbonización de la economía de Costa Rica: evaluación del Plan Nacional de Descarbonización bajo incertidumbre / David G. Groves, James Syme, Edmundo Molina-Perez, Carlos Calvo, Luis Víctor-Gallardo, Guido Godínez-Zamora, Jairo Quirós-Tortós, Felipe De León, Valentina Saavedra Gómez, Adrien Vogt-Schilb. p. cm. — (Monografía del BID ; 863)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Carbon dioxide mitigation-Costa Rica-Costs. 2. Greenhouse gas mitigation-Costa Rica-Costs. 3. Climate change mitigation-Costa Rica-Costs. 4. Climatic changes-Government policy-Costa Rica. 5. Environmental policy-Costa Rica. I. Groves, David G. II. Syme, James. III. Molina-Perez, Edmundo. IV. Calvo, Carlos. V. Víctor-Gallardo, Luis. VI. Godínez-Zamora, Guido. VII. Quirós-Tortós, Jairo. VIII. De León, Felipe. IX. Saavedra Gómez, Valentina. X. Vogt-Schilb, Adrien. XI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. XII. Serie. IDB-MG-863

Códigos JEL: Q10, Q18, Q20, Q28, Q30, Q38, Q40, Q48, Q50, Q54, Q58, R40

Palabras Clave: Mitigación al cambio climático, análisis costo-beneficio, Costa Rica, Descarbonización

Este estudio es producto de una colaboración entre el Laboratorio de Investigación de Potencia y Energía Eléctrica (EPERLab) de la Universidad de Costa Rica, la RAND Corporation, la Dirección de Cambio Climático (DCC) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) de Costa Rica y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Copyright © 2020 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- CompartirIgual (CC-IGO 3.0 BY-NC-SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial, sea como obra original o como cualquier obra derivada, siempre que se le otorgue el reconocimiento al BID y que las obras derivadas estén sujetas a una licencia que prevea los mismos términos y condiciones que la licencia aplicable a la obra original.

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 CNUDMI (UNCITRAL). 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 CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Prólogo

Las crisis sanitaria y económica han revelado las limitaciones de los sistemas de crecimiento actuales. La relación desequilibrada que tenemos con el medioambiente nos expone a pandemias zoonóticas como la de COVID-19, y el déficit de desarrollo social hacen que los mismos hogares que enfrentan las mayores dificultades económicas sean los que sufran más de crisis ambientales como esta pandemia. En Costa Rica como en el mundo, hoy la prioridad es detener la pandemia, aliviar su impacto social, y reactivar los motores de la economía.

Pero no podemos regresar a la antigua normalidad. Esta crisis nos da un indicio sobre los impactos que traerá la crisis climática si no cambiamos el paradigma de desarrollo. Debemos avanzar hacia una recuperación sostenible que genere empleos y propicie el crecimiento, pero también que aumente inclusividad, incremente nuestra resiliencia, reduzca las emisiones de gases de efecto de invernadero, y proteja nuestros ecosistemas.

La economía verde, azul y naranja es la manera de salir de esta crisis. La sostenibilidad ambiental puede conllevar beneficios sociales y económicos. El estudio que tiene en sus manos demuestra que la implementación del Plan Nacional de Descarbonización le traerá \$41 mil millones en beneficios netos a la economía de Costa Rica entre 2020 y 2050. Los territorios rurales podrían ser los que más se beneficien. La mejora de los rendimientos agrícolas y los servicios ecosistémicos proporcionados por los bosques, como el apoyo al turismo, valen mucho más que las inversiones necesarias para reducir las emisiones en la agricultura y la ganadería y que el valor financiero de la tierra dedicada a los bosques que capturan carbono de la atmosfera al crecer.

En las ciudades, los beneficios de la descarbonización también son mayores a los costos. Los ahorros de energía, la reducción de accidentes, la mejora de la competitividad ligada a la reducción de las presas y la reducción de los impactos económicos de la contaminación del aire sobre la salud compensan con creces los costos inicialmente más altos de cambiarse a vehículos eléctricos y de construir infraestructura para modernizar al transporte público. Las ganancias de eficiencia en la industria y el valor económico de los materiales reciclados son otros beneficios de la descarbonización. El Plan Nacional de Descarbonización no implica un sacrificio económico para Costa Rica. Al contrario: bien ejecutado, puede ser provechoso para todos y todas.

La historia de Costa Rica demuestra que el crecimiento verde es posible. Los esfuerzos de conservación y restauración de ecosistemas en los 30 últimos años son ejemplo en este tema. Además de revertir la deforestación y reducir drásticamente sus emisiones, el país consiguió crear nuevos modelos de negocios para sus agricultores con cultivos que llegan a nichos de altísima calidad y hacer de Costa Rica la destinación símbolo de ecoturismo en la que se volvió.

Ahora la transición hacia una economía con cero emisiones netas tienen que llevarla a cabo también los sectores productivos, las empresas, y la sociedad civil, con el apoyo del gobierno.

Para hacerlo, durante dos años de trabajo con el Banco Interamericano de Desarrollo, hemos facilitado el diseño participativo de estrategias de desarrollo carbono neutral. Empezamos por construir con la Universidad de Costa Rica modelos que permitan cuantificar las visiones de los diferentes sectores en un marco común, aprovechando la experiencia de analistas de la RAND, elegidos entre los

mejores internacionalmente. Este esfuerzo facilita que las políticas públicas se beneficien tanto de la ciencia académica y del conocimiento que los actores de cada sector traen a la mesa.

El análisis costo-beneficio presentado aquí fue nutrido de información provista por actores de los sectores energía, transporte, edificaciones, industria, residuos, agricultura y ganadería y bosques. Sin dejar que la pandemia los detenga, discutieron en talleres virtuales los objetivos de desarrollo, más allá de la reducción de emisiones, que el Plan debe traer consigo. Gracias a ellos, nuestros equipos han podido cuantificar los efectos que el Plan trae sobre temas como la descontaminación y descongestión de las ciudades, los servicios ecosistémicos provistos por los sistemas naturales, la productividad de los sistemas agrícolas y la importación de combustibles fósiles.

El año 2020 nos ha planteado retos mayúsculos y los años que vienen serán complejos y difíciles de navegar. La descarbonización ofrece una oportunidad de pensar en un futuro más próspero, más sustentable, más limpio, y en mayor armonía con la naturaleza. Pero este futuro no puede ser impuesto desde arriba: tiene que ser construido por cada persona, cada comunidad, cada empresa, y cada entidad pública. El trabajo presentado aquí contribuye con ideas y ejemplos de cómo los gobiernos y cooperantes internacionales pueden facilitar este proceso.



Carlos Alvarado Quesada
Presidente de la República de
Costa Rica

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'C. Alvarado', written over a horizontal line.



Andrea Meza Murillo
Ministra de Ambiente y Energía de
Costa Rica

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. Meza', written over a horizontal line.

Prefacio

Costa Rica es uno de los pocos países que posee un objetivo absoluto e incondicional de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Su Plan Nacional de Descarbonización (PNdD), publicado en 2019, establece el objetivo de convertirse en un país con carbono neutralidad para el año 2050. Eso significa que las emisiones locales de Costa Rica serán equivalentes a la captura de carbono local realizada por los bosques y demás sumideros de carbono. El PNdD propone un conjunto de acciones organizadas en torno a diez ejes que representan los principales sectores económicos y de infraestructura de la economía de Costa Rica. Para reducir las emisiones en todos los sectores, se requerirán inversiones iniciales, pero estas son consistentes con la estrategia de desarrollo económico de Costa Rica y se traducirán en importantes beneficios para la sociedad. La intención de este informe es informar a los tomadores de decisiones, encargados de formular políticas y otras partes interesadas en Costa Rica sobre los beneficios y los costos del PNdD, las opciones relevantes para su implementación y las oportunidades para hacer de este un plan más sólido.

En este estudio, estimamos los beneficios y los costos del PNdD en condiciones de incertidumbre para ayudar a que Costa Rica refine e implemente su plan de descarbonización. Este estudio es un trabajo conjunto del EPERLab (Laboratorio de Investigación en Potencia y Energía) de la Universidad de Costa Rica, RAND Corporation, la Dirección de Cambio Climático de Costa Rica y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Se financió mediante el Fondo Climático Francés (RG-T3193) y la Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático (RG-T2713) del Banco Interamericano de Desarrollo. Este estudio se basa en el Programa de Estudios Económicos y Sectoriales (RG-K1447) financiado por el BID en 2019, el cual evaluó los beneficios y los costos de descarbonizar solo el sector de transporte. Dicho análisis se publicará en una revista académica.

El modelo desarrollado para este estudio se mejorará en futuros proyectos mediante la inclusión de modelos detallados del sector de aguas y tierras que se encuentra actualmente en desarrollo por parte de la Universidad de Costa Rica. Esa información también se utilizará para respaldar las actualizaciones de Costa Rica a su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC). Este estudio forma parte de una serie de análisis económicos del PNdD que está llevando a cabo el BID. Otros estudios próximos incluyen el análisis de las opciones para alinear la estrategia fiscal de Costa Rica con los objetivos de descarbonización, una evaluación de las opciones para financiar el pago proporcional por los servicios ecosistémicos y el diseño de un programa de inversión para implementar el plan de descarbonización. Por último, este estudio proporciona un ejemplo que es valioso para otros países e instituciones de desarrollo interesados en analizar las estrategias de descarbonización.

Acerca de RAND Social and Economic Well-Being

RAND Social and Economic Well-Being es una división de RAND Corporation que busca activamente mejorar la salud y el bienestar social y económico de las poblaciones y comunidades alrededor

del mundo. Esta investigación se realizó dentro del marco del Programa de Políticas Ambientales y Salud de la Comunidad de la sección RAND Social and Economic Well-Being. Este programa se centra en temas tales como infraestructura, ciencia y tecnología, diseño comunitario, promoción de la salud en la comunidad, migración y dinámica de la población, transporte, energía, y clima y medioambiente, entre otros temas relacionados con el ambiente natural y construido por el hombre, la tecnología y las organizaciones e instituciones de la comunidad que afectan el bienestar y que deben considerarse en la formulación de políticas. Para más información, puede escribir a chep@rand.org.

Acerca del EPERLab de la Universidad de Costa Rica

El Laboratorio de Investigación en Potencia y Energía (EPERLab) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica desarrolla herramientas de planificación relacionadas con el nexo existente entre el clima, la tierra, la energía y el agua, y lleva a cabo investigaciones de vanguardia sobre su vínculo con la sociedad. El objetivo es brindar soluciones prácticas e innovadoras a los sectores académicos y no académicos, para lo cual reúne equipos multi y transdisciplinarios, y crea alianzas con los sectores público y privado a fin de ofrecer un conocimiento riguroso y sólido a diferentes públicos. Desde su fundación en el año 2013, EPERLab ha colaborado con diferentes ministerios gubernamentales para proporcionarles asistencia técnica en el diseño de políticas. Para más información, puede escribir a eperlab.eie@ucr.ac.cr.

Acerca de la Dirección de Cambio Climático de Costa Rica

La Dirección de Cambio Climático de Costa Rica es una oficina del Ministerio de Ambiente y Energía responsable de articular las políticas públicas sobre el cambio climático en el país. Desde su creación en el año 2010, ha trabajado con la sociedad civil, el sector privado, el sector académico y + partes del sector público para descarbonizar la economía de Costa Rica y aumentar la resiliencia de su sector social y económico.

Acerca del Banco Interamericano de Desarrollo

El Banco Interamericano de Desarrollo es la principal fuente de financiamiento a largo plazo para los proyectos económicos, sociales e institucionales de Latinoamérica y el Caribe. Además de préstamos, subsidios y garantías, el BID realiza investigaciones de vanguardia para ofrecer soluciones innovadoras y sostenibles respecto de los desafíos más urgentes de la región. Fundado en 1959 para ayudar a acelerar el progreso de los países miembros en desarrollo, el BID sigue trabajando día a día para mejorar la vida de las personas.

Contenido

Prólogo	iii
Prefacio	v
Gráfico	ix
Cuadros	xi
Resumen	xv
Agradecimientos	xxv
Abreviaciones	xxvii
CAPÍTULO UNO	
El ambicioso plan de Costa Rica de descarbonizar para el año 2050	1
CAPÍTULO DOS	
Enfoque para analizar los costos y beneficios del plan de descarbonización de Costa Rica bajo condiciones de incertidumbre	5
Descripción general del enfoque.....	5
Aprendiendo de las partes interesadas.....	5
Modelado de las futuras emisiones de GEI, costos y beneficios.....	6
Consideración de la incertidumbre respecto a emisiones y descarbonización en el futuro.....	19
Identificación de las vulnerabilidades para brindar fundamento a la implementación del Plan Nacional de Descarbonización.....	22
CAPÍTULO TRES	
Los costos y beneficios del Plan de Descarbonización de Costa Rica, considerando supuestos estándares	23
Costos y beneficios generales de descarbonizar la economía de Costa Rica.....	23
Detalle sector por sector de las emisiones, beneficios y costos.....	27
CAPÍTULO CUATRO	
¿Qué grado de incertidumbre hay respecto al éxito que pueda tener el Plan de Descarbonización de Costa Rica?	39
Rango de emisiones y beneficios netos en diferentes futuros inciertos.....	39
¿Qué factores podrían hacer que el Plan de Descarbonización no consiga sus objetivos?.....	40
Identificación de los principales impulsores y vulnerabilidades.....	42

Resumen de las vulnerabilidades del Plan Nacional de Descarbonización 54

CAPÍTULO CINCO

Facilitar la descarbonización en Costa Rica 57

Gestar apoyos para el Plan Nacional de Descarbonización 57

Guía para la implementación del Plan Nacional de Descarbonización 57

Actualización a la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Costa Rica 59

Mejora de las limitaciones 60

Contribución a un programa mayor de políticas sobre descarbonización 60

Referencias 61

Gráfico

S.1	Lograr cero emisiones netas requiere reducir fuentes e incrementar sumideros de emisiones.....	xvi
S.2	Rural y urbano: los mayores beneficios vienen de uso de suelo y transporte.....	xvii
S.3	Los dos esenciales: uso de suelo y transporte dominan tanto en términos económicos como ambientales.....	xviii
S.4	Una excelente apuesta: en todos los escenarios excepto 21 de los 3.003 evaluados, la descarbonización trae beneficios económicos netos.....	xxi
2.1	Esquema del modelado correspondiente al modelo Integrated Decarbonization Pathways para Costa Rica.....	8
3.1	Emisiones GEI en Costa Rica, por sector, a lo largo del tiempo, sin descarbonización (izquierda) y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización (derecha) según los supuestos de referencia.....	23
3.2	Reducción en las emisiones de Costa Rica para el año 3050, con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización, según los supuestos de referencia.....	24
3.3	Los costos y beneficios anuales del Plan de Descarbonización de Costa Rica según los supuestos de referencia, por sector.....	25
3.4	Beneficios netos descontados total de la implementación del Plan Nacional de Descarbonización según los supuestos de referencia, por sector.....	26
3.5	Beneficios netos y reducción de emisiones, descontados entre 2020 y 2050, por sector.....	27
3.6	Emisiones del sector de transporte sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización.....	28
3.7	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de transporte, considerando los supuestos de referencia.....	28
3.8	Cambio en el consumo de electricidad por parte de los sectores de transporte, edificios, industria y agricultura.....	29
3.9	Costo normalizado de la electricidad a lo largo del tiempo sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización.....	30
3.10	Emisiones del sector de edificios sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización.....	31
3.11	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de edificios, considerando los supuestos de referencia.....	31
3.12	Emisiones del sector industrial sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización.....	32
3.13	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector industrial, según los supuestos de referencia.....	33
3.14	Emisiones del sector de residuos sin descarbonización y con la implementación del	

	Plan Nacional de Descarbonización, según los supuestos de referencia.....	34
3.15	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de residuos, considerando los supuestos de referencia	34
3.16	Emisiones de los sectores de agricultura y ganadería sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización.....	35
3.17	Emisiones del sector de soluciones basadas en la naturaleza sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización.....	36
3.18	Beneficios y costos de la descarbonización para los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza, según los supuestos de referencia.....	37
4.1	Proyecciones sobre las emisiones GEI, sin descarbonización (amarillo) y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización (verde), en 3.003 futuros plausibles.....	39
4.2	Costos y beneficios de implementar el Plan Nacional de Descarbonización en 3.003 futuros plausibles.....	40
4.3	Beneficios netos descontados y emisiones de GEI en 2050 para los 3.003 futuros, clasificados según riesgo del resultado.....	41
4.4	Emisiones de GEI totales en 2050, según cada escenario de crecimiento económico....	42
4.5	Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Baja adopción de vehículos de combustibles alternativos”.....	44
4.6	Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Vehículos convencionales económicos y eficientes en un escenario de gran crecimiento económico”.....	45
4.7	Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Baja electrificación del transporte privado y de carga con crecimiento económico moderado”.....	46
4.8	Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Alto costo de los vehículos alternativos en condiciones de crecimiento económico bajo”.....	49
4.9	Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Escaso uso del transporte público, alta demanda del transporte de carga y vehículos eléctricos costosos”.....	50
5.1	Pantalla de inicio de la herramienta interactiva para revisar los supuestos de modelado para este estudio.....	57

Cuadros

S.1	El Plan es avanzar en todos los sectores hacia cero emisiones netas.....	xvii
S.2	Los futuros que podrían ser. Incertidumbres evaluadas en este estudio.....	xxii
S.3	Buenas perspectivas: desempeños económicos y ambientales plausibles del Plan)	xxiii
1.1	Medidas de descarbonización representativas en el Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica.....	3
2.1	Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector de transporte e implementación del modelo	11
2.2	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de transporte, según lo modelado en este estudio	12
2.3	Acciones del Plan de Descarbonización para el sector de electricidad e implementación del modelo	13
2.4	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de electricidad, según lo modelado en este estudio	13
2.5	Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector de edificios e implementación del modelo	14
2.6	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de edificios, según lo modelado en este estudio	14
2.7	Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector industrial e implementación del modelo	15
2.8	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector industrial, según lo modelado en este estudio	15
2.9	Acciones del Plan de Descarbonización para el sector de residuos e implementación del modelo	16
2.10	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de residuos, según lo modelado en este estudio	16
2.11	Categorías de cultivos y tipos de animales utilizadas en los modelos de los sectores agrícola y ganadero	17
2.12	Acciones del Plan de Descarbonización para los sectores agrícola y ganadero e implementación del modelo	17
2.13	Beneficios y costos de la descarbonización para los sectores de agricultura y ganadería, según lo modelado en este estudio.....	18
2.14	Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector de soluciones basadas en la naturaleza e implementación del modelo.....	18
2.15	Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de soluciones basadas en la naturaleza, según lo modelado en este estudio.....	19
2.16	Resumen de las incertidumbres en los modelos de emisión	21

2.17	Diseño experimental para evaluar las emisiones de GEI, los beneficios y los costos en condiciones de incertidumbre	22
4.1	Medianas de emisiones de GEI en el 2050, por sector, para los casos de emisiones de GEI totales bajas y los casos de emisiones de GEI totales altas.....	44
4.2	Principales incertidumbres y definiciones de vulnerabilidades del sector de transporte.....	47
4.3	Incertidumbres y definición de las principales vulnerabilidades del sector industrial....	48
4.4	Incertidumbres y definición de las principales vulnerabilidades del sector ganadero.....	49
4.5	Incertidumbre y definición de la principal vulnerabilidad del sector de soluciones basadas en la naturaleza.....	49
4.6	Incertidumbres y definiciones de vulnerabilidades para los beneficios netos bajos en el sector de transporte	52
4.7	Vulnerabilidades de los beneficios netos no relacionados al transporte	53

Resumen

Costa Rica ha asumido un papel de liderazgo mundial en la descarbonización mediante su Plan Nacional de Descarbonización, el cual tiene por objeto alcanzar cero emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) para 2050 (Gobierno de Costa Rica, 2019b). De hecho, prácticamente todos los países del mundo han ratificado el Acuerdo de París, con el objetivo general de estabilizar el aumento de la temperatura global a un nivel muy por debajo de 2 °C, y lo más cerca posible a 1,5 °C (Naciones Unidas, 2015). Este objetivo requiere que los países diseñen planes para alcanzar cero emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) para 2050 y reducir drásticamente las emisiones de otros GEI antes de finales de siglo (Banco Interamericano de Desarrollo y Programa de Deep Decarbonization Pathways para Latinoamérica y el Caribe, 2019). Lograr la reducción de emisiones de CO₂ es de particular importancia, dado que es el principal GEI y tiene una larga vida atmosférica: una vez emitido, puede permanecer en la atmósfera durante siglos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2018).

El Plan Nacional de Descarbonización establece amplias medidas y objetivos sectoriales para lograr la descarbonización en diez ejes de acción.¹ Los objetivos centrales de esta estrategia son:

1. Mejorar el aprovechamiento de los importantes recursos naturales de Costa Rica, específicamente sus recursos de energía renovable hidroeléctrica, solar y eólica que potencialmente pueden proporcionar electricidad limpia a todos los sectores de la economía.
2. Mejorar la eficiencia y el acceso al transporte público.
3. Preservar y mejorar la capacidad de captura de carbono de los abundantes recursos forestales de Costa Rica.
4. Mejorar los procesos para reducir el uso de energía y la intensidad de carbono en edificios, la industria, la agricultura y la ganadería.
5. Recolectar, tratar y reutilizar los residuos líquidos y sólidos.

Para facilitar estos cambios, el Plan Nacional de Descarbonización establece una amplia gama de reformas políticas e institucionales (Gobierno de Costa Rica, 2019b).

Poco más de un año después de la publicación del Plan Nacional de Descarbonización la pandemia COVID-19 golpeó al mundo, infringiendo graves efectos socioeconómicos en las familias y empresas costarricenses. La prioridad inmediata es detener la crisis sanitaria, atender sus repercusiones sociales y reactivar la economía. La buena noticia es que existen oportunidades de recuperación que a su vez pueden abordar muchos de los desafíos sociales, ambientales, políticos y económicos previos a la pandemia COVID-19 (Saget, Vogt-Schilb, y Luu, 2020). Por ejemplo, mejoras en movilidad mediante un sistema de transporte público modernizado, mejoras en las condiciones sanitarias y ambientales

¹ En Costa Rica, descarbonización y cero emisiones netas significa que todas las emisiones de GEI (no solo de CO₂) no excedan la captura natural de los bosques.

gracias a la reducción del uso de combustibles fósiles contaminantes o de aguas residuales no tratadas, y el aumento del empleo en zonas rurales gracias a los esfuerzos de descarbonización en el sector de uso del suelo pueden aumentar la sostenibilidad y la equidad de la economía. Ahora más que nunca, resulta imprescindible comprender mejor los costos y beneficios asociados a la descarbonización a fin de asegurar su alineación con la recuperación económica y el desarrollo que tanto se necesitan.

En este estudio aplicamos una metodología novedosa de toma de decisión bajo incertidumbre profunda para evaluar si la implementación del Plan Nacional de Descarbonización tiene sentido económico para Costa Rica más allá del cumplimiento de sus compromisos internacionales, analizando si los beneficios del plan superan los costos para el país. Si este es el caso, entonces el Plan es aún más digno de una acción colectiva.

Para diseñar el análisis, consultamos con las partes interesadas nacionales que representan a más de 50 agencias gubernamentales, industrias y organizaciones no gubernamentales de Costa Rica para comprender mejor la forma en que la descarbonización interactúa con objetivos de desarrollo sectoriales (apéndice). Creamos un nuevo marco analítico que integra modelos de los sectores de transporte, electricidad, edificios, industria, residuos, agricultura, ganadería y bosques. Dicho marco nos permite estimar las emisiones de GEI en escenarios sin esfuerzos de descarbonización y escenarios con la implementación del Plan.

El marco de modelación estima los costos y beneficios que la implementación del Plan Nacional de Descarbonización traería a Costa Rica como nación. No examinamos en detalle qué costos y beneficios corresponden a un hogar, grupo de ingresos, empresa o agencia gubernamental en particular, sino que nos centramos en el efecto compuesto. Tampoco evaluamos qué instrumentos de política específicos o cambios institucionales serían necesarios para implementar el Plan; en lugar de ello, evaluamos directamente el efecto de las transformaciones sectoriales que figuran en el Plan Nacional de Descarbonización (cuadro S.1). Por ejemplo, el Plan contempla que la movilidad en el futuro debería depender más del transporte público y que los autobuses deberían funcionar con electricidad u otras tecnologías cero-carbono.

No realizamos supuestos ni predicciones en lo que respecta a modelos de negocio para autobuses eléctricos o las repercusiones sobre las tarifas que pagan los pasajeros. Más bien mostramos que si Costa Rica implementa estos cambios puede verse beneficiada como nación gracias al ahorro de energía y a la reducción de accidentes y de la congestión vehicular. Esto justifica la importancia de perseguir estos objetivos, y de diseñar modelos de negocio que conduzcan a la adopción de autobuses cero emisiones y distribuyan sus beneficios económicos entre las empresas de autobuses, los usuarios y el gobierno.

Para incorporar la incertidumbre utilizamos el método de toma de decisiones robusta (Lempert et al., 2003; Groves y Lempert, 2007; Lempert, 2019), que permite el análisis de miles de futuros plausibles para explorar los riesgos y oportunidades asociados con la descarbonización. Como parte de este proceso hemos desarrollado una herramienta interactiva que facilita la discusión con las partes interesadas de los supuestos y resultados del estudio.²

Costos y beneficios de la descarbonización según los supuestos de referencia

En nuestro escenario de referencia, la implementación del Plan Nacional de Descarbonización conduciría a cero emisiones netas de GEI para 2050 y proporcionaría unos \$41 mil millones en beneficios

² “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Se puede acceder a la herramienta interactiva en https://public.tableau.com/profile/rand4185#!/vizhome/SWCHE071-CR_NDP-INPUTS/IntroductionEN.

Cuadro S.1
El Plan es avanzar en todos los sectores hacia cero emisiones netas

Medidas de descarbonización representativas del Plan Nacional de Descarbonización, organizada por sector y por Línea del Plan.

 <p>Movilidad y transporte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Electrificación de la flota pública y privada. • Conversión del transporte de carga a uno libre de petróleo. • Mayor uso del transporte público y vehículos privados compartidos. • Despliegue del tren eléctrico de pasajeros en la gran área metropolitana. • Estabilización de la flota de motocicletas para 2025, y planificación de su descarbonización. • Infraestructura para recarga de electricidad y abastecimiento de hidrógeno. • Trenes eléctricos para pasajeros y de carga.
 <p>Sistema de electricidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lograr y mantener generación 100% renovable del sistema eléctrico. • Actualización de los sistemas de transmisión y distribución para apoyar la electrificación de la economía.
 <p>Edificios</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Electrificación y aumento de la eficiencia energética. • Adopción de prácticas y tecnologías de construcción de bajas emisiones.
 <p>Industria</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora de los procesos para reducir el uso de energía. • Electrificación de procesos. • Mejoras en los procesos para reducir las emisiones.
 <p>Gestión de residuos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del reciclaje y el compostaje. • Cobertura completa del sistema de alcantarillado y saneamiento.
 <p>Agricultura</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejores prácticas agrícolas.
 <p>Ganadería</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoras en la gestión de pastizales y estiércol.
 <p>Soluciones basadas en la naturaleza</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento y aumento de los bosques. • Restauración y protección de las zonas costeras y rurales.

netos en toda la economía de Costa Rica entre 2020 y 2050, descontados a una tasa del 5% anual. El Plan Nacional de Descarbonización ahorraría o proporcionaría \$78 mil millones en beneficios, y sus costos serían de unos \$37 mil millones. Existe una gran incertidumbre en torno a estas estimaciones, pero el análisis muestra que, en la gran mayoría de los supuestos plausibles sobre el futuro, el Plan alcanzaría o casi alcanzaría sus objetivos de reducción de emisiones y lo haría con un beneficio económico neto.

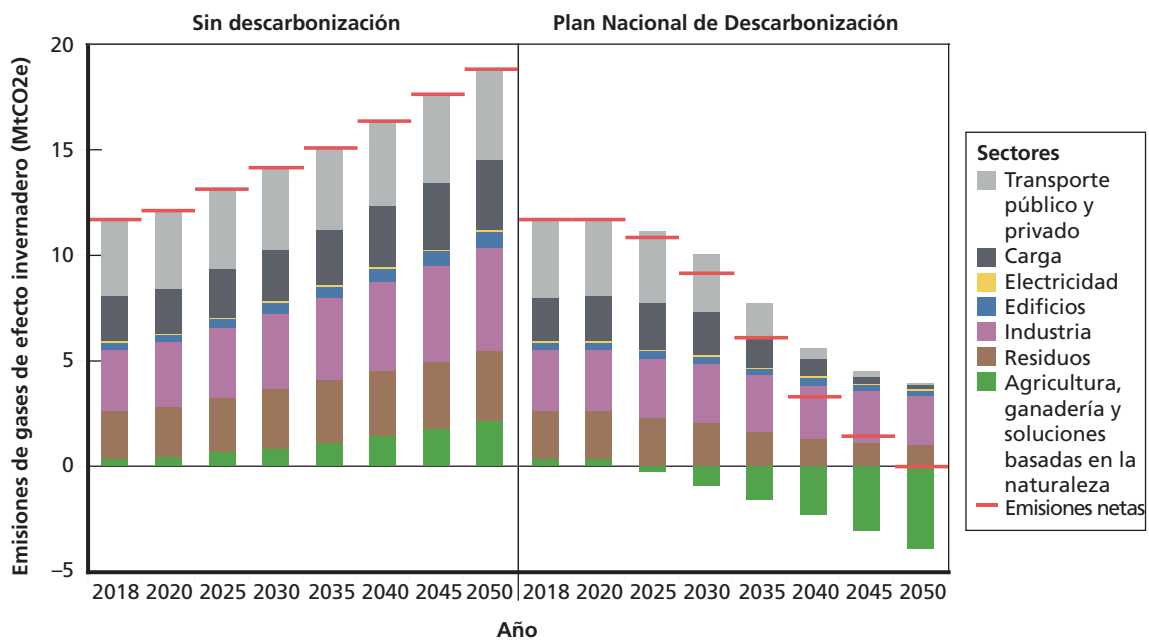
Si no se cuenta con un enfoque y una inversión coordinada en materia de descarbonización, las emisiones netas de GEI de Costa Rica podrían aumentar de unos 12 megatonnes de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) en la actualidad a cerca de 19 MtCO₂e en 2050. Desviar esta trayectoria para llegar a cero emisiones netas al 2050 requerirá una transformación sustancial en la forma en que la economía usa energía y en cómo se utilizan y preservan los recursos naturales. Si Costa Rica implementa con éxito su Plan Nacional de Descarbonización, alcanzaría cero emisiones netas para 2050 (gráfico S.1). Las mayores reducciones de emisiones netas se producirían en el sector del transporte, el cual podría ver una reducción de 7,4 MtCO₂e para 2050. También se produciría una reducción significativa en los sectores agrícola, ganadero y forestal, con un total de 6 MtCO₂e. Las reducciones en edificios, industria y residuos suponen una reducción adicional de 5.4 MtCO₂e.

Según los supuestos de referencia, la completa implementación de todos los ejes de acción del Plan generaría unos \$41 mil millones en beneficios netos. Los mayores beneficios provienen de acciones que inciden en las emisiones netas del transporte, la agricultura, la ganadería y los bosques (gráfico S.2).

En los sectores de la agricultura, la ganadería y las soluciones basadas en la naturaleza, los servicios ecosistémicos que prestan los bosques, tales como los productos forestales, los beneficios para el

Gráfico S.1
Lograr cero emisiones netas requiere reducir fuentes e incrementar sumideros de emisiones

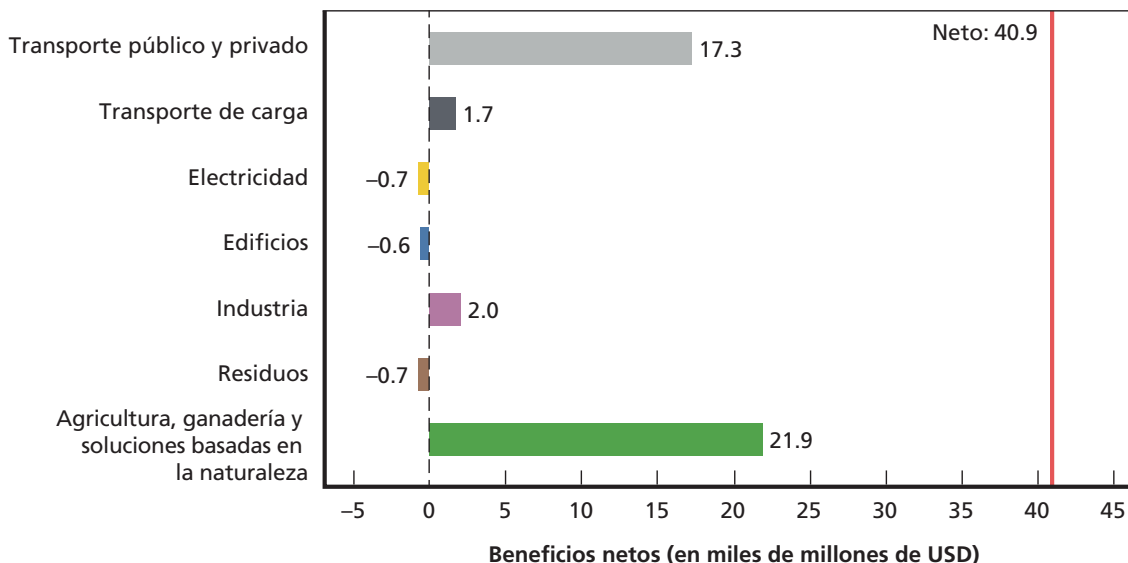
Emisiones de gases de efecto invernadero, por sector, a lo largo del tiempo, sin descarbonización (izquierda) y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización (derecha) según los supuestos de referencia. Las emisiones del sector eléctrico son demasiado pequeñas para aparecer en la gráfica.



NOTA: Las emisiones del sector de electricidad en Costa Rica son despreciables si se utilizan los supuestos de referencia.

Gráfico S.2**Rural y urbano: los mayores beneficios vienen de uso de suelo y transporte**

Beneficios netos descontados de la implementación del Plan Nacional de Descarbonización según los supuestos de referencia, por eje de acción.



agua y el suelo, el apoyo al turismo y al patrimonio cultural, así como la mejora de los rendimientos superan con creces las inversiones necesarias para descarbonizar y el costo de oportunidad de las tierras dedicadas a los bosques, lo que proveería beneficios netos descontados de cerca de \$22 mil millones. El transporte público y privado, junto con el de carga, proporcionaría \$19 mil millones en beneficios netos bajo supuestos de referencia, ya que los beneficios económicos derivados del ahorro de energía, el menor número de accidentes, el tiempo ahorrado gracias a la reducción de la congestión vehicular y la disminución de los efectos negativos de la contaminación atmosférica en la salud compensan con creces los costos iniciales más elevados del cambio a los vehículos eléctricos y la construcción de infraestructura para el transporte público (Godínez-Zamora et al., 2020).

El aumento de la eficiencia en la industria y el valor económico de los materiales reciclados y las aguas residuales tratadas dan como resultado un moderado beneficio neto para la industria y los residuos: \$1.3 mil millones en conjunto. El gráfico S.2 muestra modestos costos netos para los ejes de acción de electricidad y edificios. Sin embargo, los beneficios de una electricidad más barata se contabilizan en los ejes de acción de transporte, industria y edificios.

Por los beneficios y los costos a lo largo del tiempo, la categoría más grande de beneficios consiste en los ahorros derivados de la electrificación y la eficiencia energética. Esto incluye la reducción de los costos de combustible en el sector del transporte debido a la adopción de vehículos eléctricos y de hidrógeno y el ahorro de costos energéticos en los sectores de la construcción y la industria gracias a medidas de eficiencia energética. Los servicios ecosistémicos incluyen los productos forestales no maderables, beneficios para la calidad del agua y el suelo asociados a la conservación de ecosistemas, y el apoyo al turismo y al patrimonio cultural suministrado por los mismos. La economía circular incluye los beneficios del reciclaje de materiales y la reutilización de aguas residuales. Los otros beneficios económicos incluyen ahorros en salud y el aumento de la productividad.

Para implementar el Plan, Costa Rica incurrirá en costos de inversión y costos de oportunidad. Los costos de inversión incluyen elementos como el costo de los baterías asociados a la movilidad eléctrica y de los autobuses para mejorar el transporte público, la compra de equipos energéticamente eficientes y la conversión del uso de energía de los edificios en electricidad. Los costos de oportunidad incluyen los relacionados con la conservación de los bosques primarios en lugar de utilizar la tierra para la producción de madera, la agricultura o la ganadería.

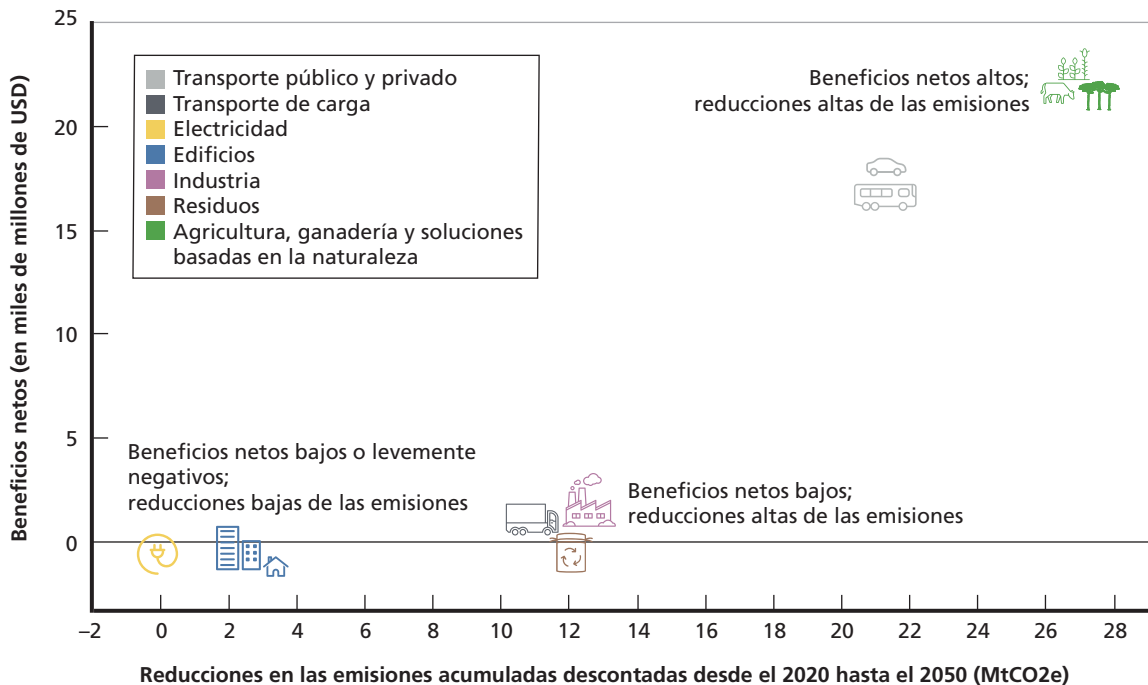
La mayoría de los costos y beneficios del plan están relacionados con el sector privado. Por ejemplo, la mayor parte del costo de la implementación de los ejes de acción en materia de transporte corresponden a inversiones necesarias para que los automovilistas adquieran vehículos eléctricos, y los mismos automovilistas son quienes, con el tiempo, se beneficiarán de los menores costos de energía y mantenimiento. Sin embargo, nuestro estudio se centra en los costos y beneficios del plan de descarbonización a nivel nacional.

La distribución de los costos y beneficios del plan entre los actores económicos y a lo largo del tiempo, y en particular el costo fiscal del Plan Nacional de Descarbonización, depende de qué instrumentos de política usa el gobierno para implementarlo. Si, por ejemplo, el gobierno subvenciona los vehículos eléctricos para incentivar su adopción, esto haría que parte del costo pasara de los automovilistas a los contribuyentes. Si el gobierno contratara deuda externa para financiar dicha subvención, esto desplazaría los costos de los contribuyentes actuales a los contribuyentes del futuro. Lo mismo cabe decir de los costos asociados con la descarbonización de edificios y residuos. En este estudio no analizamos estas cuestiones de distribución.

El gráfico S.3 muestra las emisiones y los beneficios netos por sector. Destaca que unos pocos ejes de acción conducen a grandes reducciones de las emisiones y a significativos beneficios económicos.

Gráfico S.3
Los dos esenciales: uso de suelo y transporte dominan tanto en términos económicos como ambientales

Beneficios netos y reducción de emisiones, acumulados y descontados entre 2020 y 2050, por línea de acción.



cos netos—agricultura, soluciones basadas en la naturaleza, ganadería y transporte público y privado. Si bien el desarrollo histórico en esos sectores ha dado lugar a importantes beneficios económicos, también ha tenido repercusiones económicas involuntarias. Por ejemplo, la congestión vehicular, los accidentes de tránsito, y los efectos de la contaminación vehicular sobre la salud hoy suponen costos significativos para la sociedad (aproximadamente \$5 mil millones anuales). Las estrategias de descarbonización para el sector del transporte reducirían tanto las emisiones como estos costos económicos asociados con el transporte. De igual manera, el desarrollo de la agricultura y la ganadería en Costa Rica (y en todos los demás países) ha reducido valiosos servicios ecosistémicos. Las actividades que reducen las emisiones y aumentan su captura, como una mejor gestión de los bosques o una mejor gestión del estiércol, también pueden restaurar muchos de estos servicios ecosistémicos perdidos.

Existe un gran potencial para reducir las emisiones de GEI mediante los ejes de acción del transporte de carga, industria y residuos; y los beneficios son de escala similar a los costos. Por ejemplo, hay beneficios significativos debido a la mejora de la eficiencia económica y a la reutilización de los residuos sólidos y líquidos, pero las inversiones necesarias para lograr esos beneficios también son cuantiosas.

Por último, las medidas de descarbonización en electricidad y edificios darían lugar a reducciones de emisiones mucho menores y a costos netos modestos. Esto se debe al bajo nivel de emisiones que actualmente se asocia a estos sectores y, en el caso de la electricidad, a que consideramos la mayor parte de los beneficios que trae la electricidad renovable en el sector del transporte.

Maximización de los beneficios de la descarbonización bajo incertidumbre

Un programa de transformación económica de 30 años entraña muchas incertidumbres. Existe incertidumbre acerca de cómo la población y la economía costarricense crecerá y cambiará en las próximas décadas. Existe incertidumbre acerca de la disponibilidad y costos de las nuevas tecnologías necesarias para la descarbonización. Existe incertidumbre acerca del estado y funcionamiento de los vastos recursos forestales de Costa Rica, que juegan un papel clave en la captura de CO₂. También existe incertidumbre en cuanto a la eficacia del Plan para impulsar los cambios necesarios para descarbonizar.

Exploramos las emisiones y los beneficios netos del Plan Nacional de Descarbonización a través de una amplia gama de diferentes supuestos sobre el futuro. Concretamente, repetimos nuestros cálculos de emisiones, beneficios, y costos para 3.003 futuros plausibles, reflejando diferentes supuestos sobre 300 incertidumbres resumidas en el cuadro S.2, y 47 factores adicionales utilizados para estimar los beneficios y costos individuales del Plan. Algunas de estas incertidumbres afectan las condiciones tecnológicas y socioeconómicas subyacentes que impulsan las emisiones—incertidumbres de los impulsores—y algunos afectan la eficacia de las medidas de descarbonización—incertidumbres de la descarbonización.

Encontramos que, para la gran mayoría de los casos, implementar el Plan Nacional de Descarbonización conduciría a casi cero emisiones netas, y lo haría con beneficios netos positivos (gráfico S.4).

El cuadro S.3 resume la distribución de las reducciones de emisiones, los beneficios, los costos y los beneficios netos en los distintos futuros plausibles. Estas distribuciones no deben interpretarse de manera probabilística, sino que sugieren la gama de resultados plausibles para cada línea de acción. Para entender el significado de los rangos calculados de emisiones y beneficios netos para los esfuerzos de descarbonización en Costa Rica, identificamos las condiciones que conducirían a altas emisiones o a beneficios netos bajos.

En el sector transporte, nuestro análisis destaca el riesgo de un crecimiento descontrolado de vehículos privados basados en combustibles fósiles. Incumplir los objetivos del Plan Nacional de Des-

Cuadro S.2**Los futuros que podrían ser. Incertidumbres evaluadas en este estudio.**

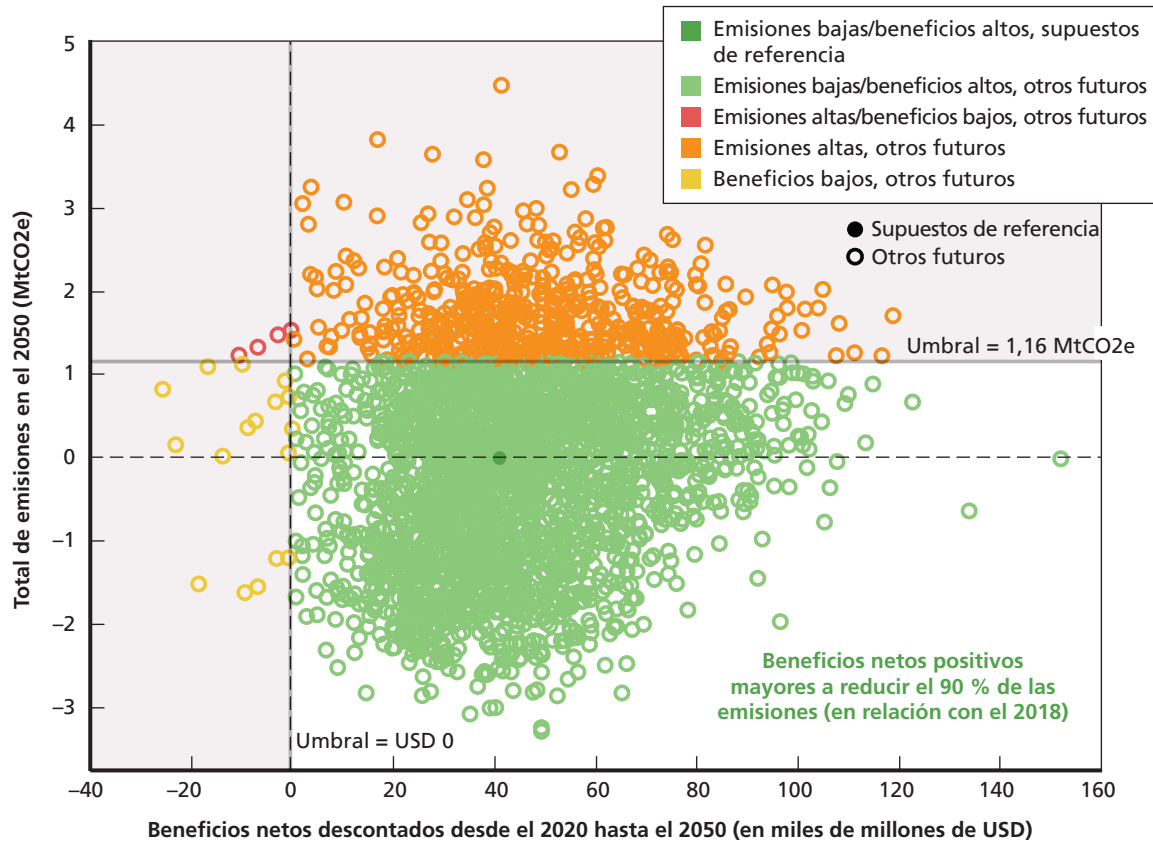
Para cada uno de los sectores, una serie de elementos deben considerarse en incertidumbre para realizar este análisis.

Sector	Incertidumbres de los impulsores	Incertidumbres de la descarbonización
Todos	<ul style="list-style-type: none"> Tasa de crecimiento económico 	
Movilidad y transporte	<ul style="list-style-type: none"> Demanda de transporte (vinculada al crecimiento económico) Costo de los combustibles Costos de infraestructura para la electrificación, cambios de combustible y cambios modales Costos tecnológicos Elasticidad de la demanda de los diferentes medios de transporte Tasas de adopción de nuevas tecnologías 	<ul style="list-style-type: none"> Crecimiento del transporte público eléctrico y de hidrógeno Crecimiento del transporte eléctrico privado y de carga Crecimiento del transporte de hidrógeno de carga pesada Crecimiento de la proporción del transporte no motorizado y del uso del transporte público
Sistema de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> Costo de las nuevas energías renovables 	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollo de nuevas energías renovables para satisfacer la creciente demanda
Edificios	<ul style="list-style-type: none"> Población Tasas de ocupación de las viviendas Actividad económica comercial 	<ul style="list-style-type: none"> Uso de la energía de las viviendas Porcentaje de electrificación de los hogares Uso de energía por cantidad de actividad económica Porcentaje de electrificación comercial
Industria	<ul style="list-style-type: none"> Producción de cemento y otros productos industriales Tasas de descarbonización del cemento y otros productos industriales Valor industrial añadido 	<ul style="list-style-type: none"> Tasas de descarbonización del cemento y otras producciones industriales (incertidumbre tanto del impulsor como de la descarbonización) Demanda de energía por valor Eficiencia del uso de energía no eléctrica Aumento de la electrificación de la actividad industrial
Gestión de residuos	<ul style="list-style-type: none"> Población Actividad industrial Residuos per cápita y por valor de la producción industrial 	<ul style="list-style-type: none"> Proporción de residuos que se reciclan y se convierten en abono Porcentaje de aguas residuales tratadas Metano capturado en los vertederos
Agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza	<ul style="list-style-type: none"> Valor agregado de la agricultura y la ganadería Cambio en la superficie utilizada para el cultivo y el pastoreo 	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia energética en la agricultura y la ganadería Grado de electrificación de las actividades agrícolas y ganaderas Cambio en la intensidad de GEI de la producción agrícola Cambio en las emisiones de GEI proveniente de animales y estiércol Tasas de deforestación Cambio en la captura de carbono por bosques húmedos, secos, de palmeras y manglares

carbonización en cuanto a la electrificación del parque automotor, la adopción de otras tecnologías cero-carbono y el uso de transporte público en lugar de automóviles personales significaría un aumento de las emisiones de carbono y un empeoramiento de las repercusiones económicas de la contaminación atmosférica, los accidentes y el tiempo productivo perdido en la congestión vehicular—especialmente en los escenarios de un crecimiento económico mayor al tendencial, que traería un crecimiento aún mayor para el sector transporte. Por lo tanto, es crucial que el gobierno desarrolle políticas que apoyen el transporte público, el ciclismo, los desplazamientos a pie y las tecnologías de cero emisiones para el transporte público, privado y de carga. Esto es particularmente cierto si la evolución de los costos de

Gráfico S.4**Una excelente apuesta: en todos los escenarios excepto 21 de los 3.003 evaluados, la descarbonización trae beneficios económicos netos**

Como resultado de la metodología, el informe generó 3.003 futuros plausibles. Aquí están ordenados según los beneficios (o costos) netos y las emisiones totales en el año 2050. La mayoría de estos cuadrados, marcados aquí de color verde, además están por debajo del umbral de bajas emisiones de 1.16 MtCO₂e.



la tecnología en sí no logra ofrecer incentivos suficientes para que los usuarios y las empresas hagan el cambio.

Del mismo modo, nuestro análisis destaca la importancia de reducir las emisiones procedentes de la ganadería y los procesos industriales, en particular si el futuro crecimiento económico se traduce en altos niveles de actividad en estos sectores. Por último, el éxito de la reducción de las emisiones del Plan Nacional de Descarbonización se basa en supuestos sobre el potencial de descarbonización de los bosques. Si el carbono liberado por la deforestación es mayor de lo que evaluamos ahora, entonces las acciones del Plan, tal como las modelamos, pueden no conducir a una captura suficiente para alcanzar cero emisiones netas para 2050.

La buena noticia es que prácticamente todos los futuros plausibles explorados en este estudio darían lugar a grandes beneficios netos, a pesar de que existe mucha incertidumbre. Es posible reducir parte de esta incertidumbre mediante la mejora de los datos y los modelos, que, en parte, se está llevando a cabo actualmente. La elaboración de estimaciones más precisas de los diversos factores de costo y beneficio reduciría considerablemente la incertidumbre estimada en este análisis. Algunos factores inciertos no se pueden resolver ahora y será necesario monitorearlos.

Cuadro S.3**Buenas perspectivas: desempeños económicos y ambientales plausibles del Plan**

Rangos de reducción de emisiones, beneficios, costos, y beneficios netos de la implementación del Plan Nacional de Descarbonización, por línea de acción y total, a través de los 3.003 escenarios considerados (primer cuartil; valor en el escenario de referencia; tercer cuartil).

Sector	Reducción de emisiones para 2050 gracias a la implementación del PNdD (MtCO₂e)	Beneficios (en miles de millones de USD)	Costos (en miles de millones de USD)	Beneficios netos (en miles de millones de USD)
Transporte	-9,4; -7,4; -4,9	32,2; 42,9; 51,6	6,7; 23,9; 18,9	15,5; 19,0; 42,2
Electricidad	0,0; 0,0; 0,0	0,0; 0,0; 0,0	1,8; 0,7; 3,5	-3,5; -0,7; -1,8
Edificios	-0,6; -0,5; -0,4	1,4; 1,8; 2,0	1,9; 4,9; 4,8	-3,1; -0,6; -0,2
Industria	-3,0; -2,6; -1,8	3,3; 4,2; 5,1	2,1; 2,1; 3,4	0,6; 2,0; 2,2
Residuos	-2,5; -2,3; -2,0	3,0; 3,5; 3,8	3,9; 4,2; 4,9	-1,4; -0,7; -0,6
Agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza	-6,2; -6,0; -5,6	19,3; 25,2; 25,3	3,2; 3,3; 4,0	15,9; 21,9; 21,6
Total	-21,2; -18,8; -15,5	62,6; 77,7; 84,5	20,8; 36,8; 36,4	29,8; 40,9; 56,8

NOTA: Estos resultados no implican probabilidades de reducción de emisiones, los beneficios, los costos y los beneficios netos. Este cuadro describe la distribución de los resultados en un amplio análisis de los supuestos sobre las condiciones futuras.

En general, se espera que sectores como el transporte y la soluciones basadas en la naturaleza aporten grandes beneficios netos. Si los supuestos clave de estas estimaciones no se sostienen, puede ser necesario hacer ajustes para garantizar beneficios netos altos. Por ejemplo, si los beneficios para el ecosistema derivados de las prácticas forestales mejoradas son menores de lo previsto, entonces la búsqueda de más beneficios en otros sectores conexos, como los sectores de la agricultura o la ganadería, puede ser una compensación importante.

Facilitando la descarbonización en Costa Rica y en el mundo

Las conclusiones de este estudio pueden desempeñar un papel importante para asegurar una sólida implementación del Plan Nacional de Descarbonización, logrando el alcance de sus objetivos en un futuro incierto. En nuestro análisis confirmamos qué ejes de acción son más decisivos para el éxito del Plan—transporte y soluciones basadas en la naturaleza—y luego identificamos ciertas condiciones clave necesarias para lograr emisiones netas cercanas a cero con un gran beneficio económico neto. Las conclusiones de este estudio tienden a respaldar la relevancia del Plan Nacional de Descarbonización, demostrando que la reducción de las emisiones también puede dar lugar a importantes beneficios netos para los costarricenses. Esto puede ayudar a atraer apoyo para la inversión inicial y los cambios regulatorios necesarios.

También elaboramos un nuevo marco de modelización que ya está apoyando los compromisos de las partes interesadas a medida que Costa Rica actualiza su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) en virtud del Acuerdo de París, lo que está previsto que se complete en diciembre de 2020. Existen limitaciones importantes en este estudio que podrían mejorarse en los próximos meses y

años. Si bien el modelo de los sectores del transporte y la electricidad es bastante avanzado, los modelos desarrollados para representar a los demás sectores son menos sofisticados y pueden ser mejorados.

Por último, este estudio se enmarca en un programa más amplio de investigación y política que informa acerca de la descarbonización a nivel mundial. Este trabajo muestra el valor de abordar el análisis de políticas públicas de manera que (1) sea participativo y aproveche la capacidad analítica y los conocimientos nacionales; (2) traduzca objetivo abstracto de cero emisiones netas para 2050 en acciones específicas a nivel sectorial y a lo largo del tiempo; (3) considere los costos y beneficios socioeconómicos más allá del impacto de las medidas sectoriales en las emisiones de GEI, y (4) analice la incertidumbre a través de la evaluación de futuros plausibles. Este estudio ofrece ideas y modelos que son valiosos para otros países interesados en la descarbonización, y que pueden inspirar a instituciones de desarrollo a nivel mundial.

Agradecimientos

Apreciamos enormemente el uso de la Plataforma de Modelación Económico-Ambiental Integrada (Integrated Economic-Environmental Modeling [IEEM]; un modelo de equilibrio general de la economía costarricense) del Banco Central de Costa Rica, mediante una alianza con Onil Banerjee del Banco Interamericano de Desarrollo. Muchas partes interesadas participaron en tres talleres y proporcionaron sus comentarios escritos para revisar la información.

Queremos agradecer particularmente a los siguientes revisores informales (en orden alfabético): Javier Abarca Jiménez, Onil Banerjee, Mauricio Bayona Pulido, Giulia Carcasci, Ana Rita Chacón Araya, Magda Carolina Correal Sarmiento, Andrea Denzinger, Xiomara González Hernández, Priscila Gutiérrez, Stephane Hallegatte, Marcela Jaramillo Gil, Sylvia Larrea, Rebeca Madrigal, Diana Madrigal Barquero, Johnny Montenegro Ballester, Juan Manuel Murguía, Silvia Ortiz Stradtman, Rodrigo Palma, Andrés Pica Tellez, Juan Alfredo Rihm Silva, Cristian Salas Parra, Juliana Salles Almeida, y Rosa Vasquez.

Por último, queremos agradecer también la minuciosa revisión y detallados comentarios y sugerencias de nuestros revisores formales: Leon Clark de la Universidad de Maryland y Fabián Villalobos de RAND Corporation.

Abreviaciones

BUR	II Informe Bienal De Actualización de Costa Rica
CO ₂	dióxido de carbono
CO ₂ e	dióxido de carbono equivalente
COVID-19	enfermedad por coronavirus 2019
CR-IDPM	Modelo Integrated Decarbonization Pathways para Costa Rica
EPERLab	Electric Power and Energy Research Laboratory; Laboratorio de Investigación en Potencia y Energía
GHG	gas de efecto invernadero
Gt _{km}	tonelada kilómetro bruta
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IDB	Banco Interamericano de Desarrollo
IEEM	Plataforma de Modelación Económico-Ambiental Integrada (Integrated Economic-Environmental Modeling)
kWh	kilovatio hora
LHS	muestreo por hipercubo latino
LPG	gas licuado de petróleo
MtCO ₂ e	megatonnes de dióxido de carbono equivalente
NDC	Contribución Determinada a Nivel Nacional
OSeMOSYS-CR	Sistema de modelado de energía de código abierto de Costa Rica
PJ	petajulios
PNdD	Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica
PNSAR	Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales
PRIM	Método de inducción llamado “Patient Rule Induction”
RDM	Toma de decisiones robusta (Robust Decision Making)

El ambicioso plan de Costa Rica de descarbonizar para el año 2050

Costa Rica ha adoptado un papel de liderazgo en la descarbonización global a través de su ambicioso Plan Nacional de Descarbonización (PNdD, Gobierno de Costa Rica, 2019b). Prácticamente, todos los países del mundo han ratificado el Acuerdo de París, con el objetivo general de estabilizar el aumento de la temperatura global bien por debajo de los 2 °C y lo más cerca posible de 1,5 °C (Naciones Unidas, 2015). Esta meta ambiciosa exige llegar a las cero emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) para el año 2050 y reducir drásticamente las emisiones de otros gases de efecto invernadero (GEI) antes del final del siglo.¹ El CO₂ juega un rol especial porque es el principal GEI en la atmósfera y tiene una larga duración: una vez emitido, puede permanecer en la atmósfera durante siglos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2018).

Alcanzar las cero emisiones netas de CO₂ significa tanto reducir las fuentes de las emisiones, por ejemplo, el uso de combustibles fósiles, como aumentar los sumideros de carbono, por ejemplo, ampliando los bosques, dado que los árboles captan carbono de la atmósfera a medida que crecen. El principal mensaje de la investigación climática es que mientras la economía global siga liberando más CO₂ en la atmósfera del que elimina a través de los sumideros de carbono, la temperatura global seguirá subiendo (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2018).

Expertos del país y de los diferentes sectores dentro de la comunidad científica internacional han demostrado que es técnicamente viable alcanzar las cero emisiones netas de carbono para el año 2050 y que eso podría ser beneficioso para otras metas de desarrollo, incluida la creación de 15 millones de trabajos netos en América Latina y el Caribe para el año 2030 (Saget, Vogt-Schilb y Luu, 2020). Hay otros tantos beneficios que Costa Rica podría acumular en respuesta a las iniciativas de descarbonización, tales como los beneficios para la salud por una menor polución, ahorros en los costos de combustibles gracias a la electrificación (Godínez-Zamora et al., 2020) y mayores servicios ecosistémicos por la conservación y mejora de los bosques. No obstante, el camino hacia una economía con cero emisiones netas de carbono presenta numerosos desafíos debido a barreras de planificación, reglamentaciones y político-económicas. Los planes de descarbonización son fundamentales para ayudar a que los ministerios correspondientes puedan identificar y resolver esos desafíos, en consenso con las principales partes interesadas de los sectores público y privado (Banco Interamericano de Desarrollo y Programa de Deep Decarbonization Pathways para Latinoamérica y el Caribe, 2019; Cavallo, Powell y Serebrisky, 2020).

El PNdD de Costa Rica establece amplios objetivos por sectores y acciones para descarbonizar en diez ejes de acción. Los puntos salientes de estas estrategias son los siguientes:

¹ Tener *cero emisiones* netas en este contexto significa que el total de las emisiones de GEI no supere la cantidad de CO₂ capturado por los bosques.

1. Aprovechar aún más los importantes recursos naturales disponibles de Costa Rica, específicamente sus recursos renovables hídricos, solares y eólicos, los cuales tienen el potencial de brindar electricidad limpia para todos los sectores de la economía
2. Mejorar la eficiencia del transporte público y el acceso a él
3. Preservar y mejorar las capacidades de captura de carbono por parte de los ricos recursos forestales de Costa Rica
4. Mejorar los procesos para reducir el uso de energía y la intensidad de emisiones de carbono en la industria, la agricultura y la ganadería
5. Recolectar, tratar y reutilizar los desechos líquidos y sólidos.

Para facilitar estos cambios, el PNdD propone una amplia variedad de reformas políticas. El cuadro 1.1 menciona algunas de las acciones específicas consideradas en el PNdD para todos los sectores incluidos en este estudio.

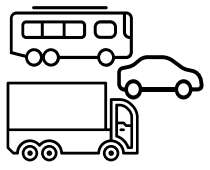
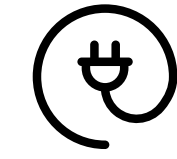
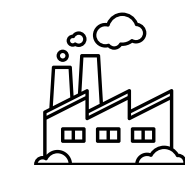
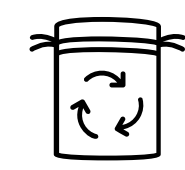
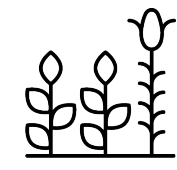
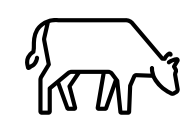

Para cada sector, el PNdD presenta una visión a largo plazo del futuro ideal que permitiría alcanzar las cero emisiones netas para el año 2050. Luego, emplea un enfoque de predicción retrospectiva para definir las metas a mediano plazo (2023-2030) para la transformación sectorial. Por último, utiliza esto como base para describir las opciones de políticas y las actualizaciones necesarias que permitirían desplegar la transformación.

Mientras Costa Rica se centra en recuperarse de forma sostenible después del COVID-19 y pasa a la definición de acciones específicas, que incluyen inversiones y cambios en las políticas para implementar el PNdD, es imprescindible entender lo que se requiere ahora y cómo Costa Rica se beneficiará en las próximas décadas. La descarbonización genera muchos beneficios además de cumplir los compromisos internacionales y evitar los impactos del cambio climático (Karlsson, Alfredsson y Westling, 2020). Entender el balance entre los beneficios y los costos puede ayudar a que Costa Rica implemente una estrategia de descarbonización exitosa y justifique, según corresponda, las inversiones iniciales. También es importante hacer un seguimiento de cómo la implementación de las estrategias de descarbonización a corto plazo puede tener un impacto acumulado para el año 2050. Eso ayudará a que las inversiones de hoy se alineen con los objetivos de descarbonización y no consoliden tecnologías o prácticas que tienen un ciclo de vida largo y que son grandes emisoras de carbono (Binsted et al., 2019; González-Mahecha et al., 2019).

Para evaluar los beneficios y los costos del PNdD, desarrollamos un modelo multisectorial que contempla las emisiones de GEI desde el presente hasta el año 2050 en todos los sectores principales de la economía costarricense. Es fundamental integrar los modelos de los diferentes sectores individuales, ya que descarbonizar algunos sectores afecta a otros (Bataille et al., 2020). Por ejemplo, la electrificación del sector de transporte aumenta la demanda total de electricidad. Si bien esto puede requerir una inversión adicional en la capacidad de generar energías renovables (este efecto es bajo en la mayoría de los casos en Costa Rica), se traduce en tarifas de electricidad más bajas. Y estas tarifas más bajas beneficiarán a todos los sectores que usan electricidad. Otra interacción importante se produce entre los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza. Si bien existe el potencial de reducir las actividades de agricultura y ganadería mediante la conservación y expansión de las áreas boscosas, otros enfoques, tales como plantar árboles en las zonas de pastoreo o en los campos agrícolas, desdibujan los límites entre las áreas boscosas, las agrícolas y las de ganadería, para beneficio de los tres sectores (Gobierno de Costa Rica, 2019b).

El modelo integrado se desarrolló dentro del marco de una colaboración activa entre investigadores universitarios, funcionarios gubernamentales y expertos internacionales en el análisis de políticas. Con el tiempo, este modelo se puede mejorar para obtener estimaciones más certeras en cuanto a

Cuadro 1.1
Medidas de descarbonización representativas en el Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica

	<p>Movilidad y transporte</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Electrificación de la flota pública y privada. • Conversión del transporte de carga a uno libre de petróleo. • Mayor uso del transporte público y vehículos privados compartidos. • Despliegue del tren eléctrico de pasajeros en la gran área metropolitana. • Estabilización de la flota de motocicletas para 2025, y planificación de su descarbonización. • Infraestructura para recarga de electricidad y abastecimiento de hidrógeno. • Trenes eléctricos para pasajeros y de carga.
	<p>Sistema de electricidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lograr y mantener generación 100% renovable del sistema eléctrico. • Actualización de los sistemas de transmisión y distribución para apoyar la electrificación de la economía.
	<p>Edificios</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Electrificación y aumento de la eficiencia energética. • Adopción de prácticas y tecnologías de construcción de bajas emisiones.
	<p>Industria</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora de los procesos para reducir el uso de energía. • Electrificación de procesos. • Mejoras en los procesos para reducir las emisiones.
	<p>Gestión de residuos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del reciclaje y el compostaje. • Cobertura completa del sistema de alcantarillado y saneamiento.
	<p>Agricultura</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejores prácticas agrícolas.
	<p>Ganadería</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoras en la gestión de pastizales y estiércol.
	<p>Soluciones basadas en la naturaleza</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento y aumento de los bosques. • Restauración y protección de las zonas costeras y rurales.

las emisiones y los beneficios y costos de la descarbonización. La construcción conjunta de los datos, modelos y enfoques analíticos permite obtener resultados que son relevantes para la toma de decisiones en Costa Rica y, además, genera la capacidad y responsabilidades necesarias para asegurar que la meta de descarbonizar siga contando con la mejor información y análisis disponibles.

En este informe, utilizamos el modelo multisectorial para estimar las emisiones de GEI que se producen sin iniciativas de descarbonización y con la implementación del PNdD. Luego, identificamos algunos de los beneficios que podrían generarse para los costarricenses y hacemos una estimación aproximada de los costos. Sin embargo, estimar los costos y beneficios de un programa de transformación económica que se implementará a lo largo de 30 años entraña gran incertidumbre. No se sabe cómo serán el crecimiento y los cambios de la población y la economía costarricenses en las próximas décadas. No hay certezas sobre la disponibilidad y los costos de las nuevas tecnologías necesarias para la descarbonización. Existe incertidumbre acerca del estado y funcionamiento de los vastos recursos forestales de Costa Rica, que desempeñan un papel clave en la captura de GEI. No se sabe cómo toda esta incertidumbre afectará la implementación de un plan de descarbonización.

Para valorar el impacto de tal falta de certeza, analizamos una amplia variedad de futuros plausibles en los que se implementará el PNdD. Esto significa evaluar miles de supuestos diferentes sobre los impulsores de emisiones y la descarbonización, así como los factores que describen cómo podrían acumularse los costos y beneficios. Utilizamos métodos para la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre profunda (Marchau et al., 2019) a modo de guía para nuestro análisis sobre los diferentes resultados del PNdD en estos tantos futuros plausibles. En particular, utilizamos el método de toma de decisiones robusta (RDM, Lempert, Popper y Bankes, 2003; Groves y Lempert, 2007; Lempert, 2019) para entender cuáles son las condiciones futuras que permitirían obtener resultados exitosos y cuáles no tanto. Esto puede servir para implementar el PNdD de forma tal de garantizar el éxito.

El Capítulo 2 de este informe describe el marco de trabajo analítico y explica brevemente cómo se modelan los sectores y los ejes de acción del PNdD. El Capítulo 3 presenta las emisiones de GEI estimadas, así como los beneficios y los costos del análisis sobre la descarbonización de Costa Rica en función de un único conjunto de supuestos de referencia. El Capítulo 4 muestra los resultados del análisis de incertidumbre y describe varios riesgos clave que el PNdD actual enfrenta en su intención de garantizar cero emisiones netas para el año 2050 y brindarle beneficios netos a Costa Rica. El Capítulo 5 destaca las conclusiones clave de este análisis y explica cómo pueden utilizarse para orientar la implementación del PNdD y la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC).

Un volumen separado, disponible en www.rand.org/t/RRA633-1, contiene los siguientes apéndices:

- Apéndice A: Detalles del modelado y los factores relacionados con los costos y beneficios por sector
- Apéndice B: Desarrollo de escenarios socioeconómicos
- Apéndice C: Detalles del análisis de vulnerabilidades del transporte
- Apéndice D: Listas de partes interesadas entrevistadas.

Enfoque para analizar los costos y beneficios del plan de descarbonización de Costa Rica bajo condiciones de incertidumbre

Descripción general del enfoque

En este estudio, desarrollamos modelos para estimar los beneficios y costos de implementar el PNdD de Costa Rica considerando muchos supuestos diferentes sobre el futuro. Utilizando un método para la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre profunda (Marchau et al., 2019) llamado toma de decisiones robusta (RDM; Lempert, Popper y Bankes, 2003; Groves y Lempert, 2007; Lempert, 2019), evaluamos los muchos beneficios y costos de descarbonizar la economía de Costa Rica en un escenario en el que no abundan las certezas. El método RDM se ha aplicado a la planificación relativa a los recursos naturales por años (Groves et al., 2008; Groves et al., 2015; Groves et al., 2019; Molina-Prez et al., 2019) y se ha utilizado para explorar las políticas de sostenibilidad a nivel global en el contexto académico (Lempert et al., 2006; Lempert, 2019). Este estudio presenta la primera vez que se lo utiliza explícitamente para evaluar una estrategia nacional de descarbonización.

Primero, creamos dos estimaciones de las emisiones de GEI de Costa Rica hasta el año 2050 con un solo conjunto de supuestos. La primera asume la ausencia de una iniciativa coordinada para descarbonizar. A esta estimación la llamamos “sin descarbonización”. Luego, estimamos de qué forma las estimaciones cambiarían con uno de los posibles métodos para implementar el PNdD (a esta estimación la llamamos “con implementación del Plan Nacional de Descarbonización”). A continuación, estimamos aproximadamente los beneficios y los costos monetarios para de brindar una valoración de alto nivel sobre los beneficios netos de descarbonizar Costa Rica.

Luego, creamos miles de futuros, cada uno basado en un conjunto independiente de supuestos sobre cómo podrían evolucionar los impulsores de emisiones, los beneficios y los costos en el futuro. Volvimos a evaluar el modo en que las emisiones de GEI costarricenses podrían evolucionar sin la descarbonización y con la implementación del PNdD, esta vez en el marco de cada futuro propuesto. Por último, utilizamos las técnicas de RDM para identificar las principales vulnerabilidades del PNdD y las formas de garantizar una implementación robusta.

Aprendiendo de las partes interesadas

A lo largo de todo el estudio, nos reunimos con partes interesadas en Costa Rica y representantes de diferentes sectores para obtener distintas perspectivas sobre los principales asuntos en torno a la descarbonización, tener información de referencia para definir el alcance del análisis técnico y revisar los resultados. El Apéndice D menciona las organizaciones de las partes interesadas que consultamos, en particular, de las siguientes actividades:

- **Talleres para definir el alcance con partes interesadas del sector de transporte (febrero de 2019) y otros sectores (julio de 2019).** En este primer conjunto de talleres, nos reunimos primero con representantes del sector de transporte y luego con otros sectores para presentarles el propósito y el enfoque del estudio. Recolectamos la opinión de los participantes sobre las métricas importantes para evaluar el rendimiento, incluidos los costos y los beneficios, las medidas de descarbonización para representar en el estudio, las principales incertidumbres que podrían afectar el éxito del PNdD y los datos y modelos disponibles. Este taller siguió una metodología para definir el alcance de un análisis de políticas a largo plazo, presentada por Lempert, Popper y Bankes (2003). En este enfoque, un debate semiestructurado entre las partes interesadas permite identificar los principales objetivos de las políticas como métricas, ejes de políticas o decisiones disponibles, posibles incertidumbres futuras y datos y conexiones disponibles que pueden utilizarse para relacionar las acciones de las políticas y los factores inciertos con los posibles resultados.
- **Talleres de revisión del análisis (febrero de 2020).** En este segundo conjunto de talleres, presentamos un análisis preliminar de las emisiones de GEI en todos los sectores con y sin la implementación del PNdD, así como el enfoque empleado para cuantificar los beneficios y estimar los costos.
- **Revisión remota interactiva de los supuestos para el modelado (junio de 2020).** A ciertas partes interesadas se les brindó un vínculo para una visualización interactiva de la información sobre los principales supuestos de cada sector representado por el PNdD.¹ Nos aportaron retroalimentación por escrito y la tuvimos en cuenta al momento de preparar el análisis final.

Modelado de las futuras emisiones de GEI, costos y beneficios

Desarrollamos un nuevo marco de trabajo para el modelado compatible con la evaluación interactiva del PNdD en condiciones de incertidumbre, y estimamos sus costos y beneficios. Este marco de trabajo combina los modelos desarrollados anteriormente para los sectores de transporte y energía (Godínez-Zamora et al., 2020) con nuevos modelos agregados de otros sectores que no cuentan con modelos más detallados. Estos modelos se basan en datos socioeconómicos y de emisiones recientes, proyecciones de los impulsores de las emisiones de GEI y factores relacionados con las emisiones, así como otros beneficios y factores de costo. (El Capítulo 3 enumera los costos y beneficios considerados por sector). El marco de trabajo está diseñado para incorporar modelos nuevos, más detallados, de emisiones, beneficios y costos.²

El Modelo Integrated Decarbonization Pathways para Costa Rica (CR-IDPM) evalúa las emisiones de GEI, así como los beneficios y costos de implementar el PNdD en diferentes sectores y futuros plausibles. En general, las emisiones de GEI se estiman en función de las proyecciones de las actividades o las cantidades de emisores/sumideros (vehículos, edificios, cantidades de residuos, tierra, procesos industriales) multiplicadas por las tasas de emisión por actividad o cantidad. Para algunos sectores, las tasas de emisión dependen de la tecnología utilizada o algún otro tipo de desagregación (p. ej., vehículos eléctricos frente a automóviles a gasolina o residuos que se utilizan como abono frente a aquellos que se destinan a vertederos). Las diferencias en las trayectorias de las actividades, las tasas de uso de las tecnologías y las tasas de emisión pueden dar lugar a distintas proyecciones de emisiones. Este estudio no contempla los beneficios económicos resultantes de la creación de puestos de empleo, pero podrían ser significativos.

¹ Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica, 2020. Se puede acceder a la herramienta interactiva en https://public.tableau.com/profile/rand4185#!/vizhome/SWCHE071-CR_NDP-INPUTS/IntroductionEN.

² Todos los costos se informan en dólares estadounidenses.

En el caso de los sectores de transporte y electricidad (ejes 1 a 4), el CR-IDPM incorpora el Sistema de modelado de energía de código abierto de Costa Rica (OSeMOSYS-CR), desarrollado y mantenido por el Laboratorio de Investigación en Potencia y Energía (EPERLab) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica (EPERLab, 2020; Godínez-Zamora et al., 2020). El sistema OSeMOSYS-CR también incluye estimaciones fijas del consumo de energía por parte de edificios (eje 5) e industria (eje 6), pero las variaciones en estas estimaciones se modelaron fuera de OSeMOSYS-CR, tal como se describe a continuación. OSeMOSYS-CR estima las emisiones de los sectores de transporte y energía basándose en las demandas del transporte, las especificaciones de las tecnologías y los combustibles utilizados para satisfacer tales demandas, los factores relacionados con las emisiones y las demandas de energía de otros sectores. Para los demás sectores: edificios (eje 5), industria (eje 6), residuos (eje 7), agricultura (eje 8), ganadería (eje 9) y soluciones basadas en la naturaleza (eje 10), el CR-IDPM incluye modelos basados en Python que proyectan emisiones, beneficios y costos según las actividades especificadas, las aplicaciones de las tecnologías o los métodos y las tasas de emisión.

Utilizamos un modelo de equilibrio general de la economía costarricense, la Plataforma de Modelación Económico-Ambiental Integrada (Integrated Economic-Environmental Modeling [IEEM]), para derivar tres escenarios de actividad económica subyacente hasta el año 2050 (Banerjee y Cicowiez, 2020 y 2019; Banerjee et al., 2019).³ La plataforma IEEM está configurada para desarrollar tres proyecciones de crecimiento económico: al 2; 3,5 y 4 por ciento al año, de conformidad con la estructura subyacente de la economía costarricense, tal como se muestra en su matriz de contabilidad social. Los patrones comerciales se modelan en la plataforma IEEM sobre los supuestos de que los servicios correspondientes se requieren en proporciones fijas en la cadena de valor. Los precios mundiales de los productos que Costa Rica comercia con el resto del mundo se tratan como parámetros exógenos. La plataforma IEEM produce, entonces, estimaciones sobre la demanda de transporte, y producción industrial, agrícola y ganadera para cada escenario económico (Apéndice B). El gráfico 2.1 muestra un esquema del CR-IDPM.

Calibramos los factores del modelo para que las emisiones de GEI por sector en 2015 coincidieran con el inventario de emisiones de GEI 2015 detallado en la publicación Costa Rica II Informe Bienal De Actualización (Gobierno de Costa Rica, 2019a), también conocida como BUR. Luego, desarrollamos estimaciones independientes sobre cómo los principales impulsores de las emisiones de GEI podrían cambiar en el futuro en las condiciones “sin descarbonización”. Después, evaluamos las emisiones hasta el año 2050 en todos los sectores de la economía para los miles de futuros plausibles, tomando en cuenta la incertidumbre.

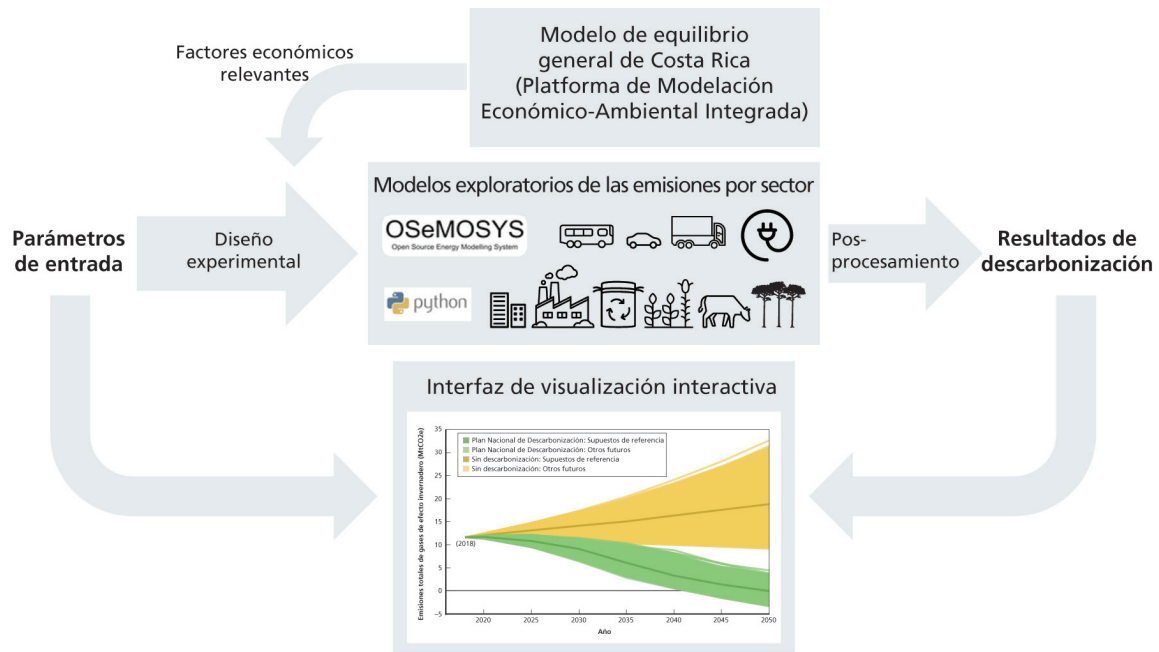
Para calcular los beneficios de la descarbonización, combinamos los resultados de los cálculos de las emisiones con factores adicionales derivados de la literatura. Por ejemplo, los beneficios para la salud de reducir las emisiones de GEI en el sector industrial se estiman multiplicando la reducción de emisiones de GEI de los procesos industriales por un factor estimado que considera cuánto de ese potencial beneficio económico podría alcanzarse al reducir la polución en Costa Rica. Este enfoque se utilizó en otras evaluaciones realizadas en Costa Rica sobre los beneficios de una menor polución, por ejemplo, Alpizar, Piaggio y Pacay (2017). Si bien estos cálculos, basados en factores de beneficio agregados, no son exactos y tienen un gran nivel de incertidumbre, proporcionan una estimación de orden de magnitud aproximado que puede compararse entre los diferentes sectores y en relación con los costos.

Para todos los sectores, incluimos los beneficios que reducir las emisiones en Costa Rica tiene en cuanto a reducir los efectos del cambio climático en este país, como el calentamiento y el incremento de las tormentas tropicales. Para esto, se combinó la reducción de emisiones por la implementación del

³ El equipo del estudio recibió la plataforma IEEM de parte del Banco Central de Costa Rica, a través de una alianza con Onil Banerjee del Banco Interamericano de Desarrollo.

Gráfico 2.1

Esquema del modelado correspondiente al modelo Integrated Decarbonization Pathways para Costa Rica



PNdD con el costo social de las estimaciones de carbono para Costa Rica (Ricke et al., 2018). Cabe destacar que estos beneficios constituyen una fracción muy pequeña de todos los beneficios que tiene la reducción del cambio climático, los cuales serían más significativos si todos los países redujeran las emisiones según el objetivo global de emisiones de 1,5 °C.⁴

Los costos de implementar las medidas de descarbonización se estiman utilizando los valores indicados en la literatura relacionada para el costo por unidad (de producción o de gases de efecto invernadero) de reducir las emisiones de carbono. En relación con el sector de transporte, el modelo utiliza costos más detallados desarrollados por investigadores de la Universidad de Costa Rica para hacer un seguimiento de los costos de capital, los costos fijos anuales y los costos variables anuales de las tecnologías utilizados en las condiciones “sin descarbonización” y “con la implementación del PNdD” (EPERLab, 2020; Godínez-Zamora et al., 2020). Para los demás sectores, los costos se estiman utilizando diferentes enfoques, según se detalla a continuación. En algunos casos, la literatura académica proporciona estimaciones de costos

⁴ La cuestión sobre cómo monetizar las reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero es compleja. Desde una perspectiva global, el principal beneficio de la descarbonización es detener la crisis climática, que, de lo contrario, tendría impactos devastadores sobre el desarrollo económico y social (Hallegatte et al., 2015). Las partes que suscribieron el Acuerdo de París acordaron que mantener el aumento de la temperatura en un rango de entre 1,5 y 2 °C es la forma adecuada de contener los costos del cambio climático sobre el desarrollo económico. El consejo internacional es valorar las reducciones de las emisiones de GEI utilizando precios del carbono coherentes con los objetivos de descarbonización que los gobiernos han establecido. Es habitual estimarlos en alrededor de \$ 50 por tonelada de CO₂ en dólares estadounidenses (USD) (Fay et al., 2015; Stiglitz y Stern 2017; Kaufman et al., 2020). Aquí tomamos un enfoque más conservador. Dado que el objeto de este estudio es destacar el costo y los beneficios de implementar el PNdD para Costa Rica, el precio del carbono que utilizamos, inferior a \$1/tCO₂, refleja una estimación de los beneficios de evitar los impactos del cambio climático solo en Costa Rica (Ricke et al., 2018). Incluso aunque Costa Rica esté expuesta a muchos impactos del cambio climático, como tormentas tropicales más intensas y elevación del nivel del mar, es una parte pequeña de la economía global. Por lo tanto, este valor es muy reducido y nuestras estimaciones para Costa Rica relativas a los impactos climáticos que puedan evitarse son despreciables en relación con los demás beneficios. Finalmente, nuestro enfoque muestra que descarbonizar Costa Rica reviste muchos beneficios económicos, incluso si dejamos de lado efectivamente el beneficio del cambio climático.

De qué modo el COVID-19 podría afectar la iniciativa de descarbonización de Costa Rica

El análisis presentado aquí se diseñó y desarrolló en gran parte antes del comienzo de la pandemia de COVID-19, en febrero del 2020. Los impactos socioeconómicos de la pandemia y los planes de descarbonización pueden interactuar de diferentes modos. No obstante, no creemos que la pandemia afecte nuestros resultados de forma drástica. Primero, la descarbonización puede comprenderse mejor como un ejercicio de predicción retrospectiva: comienza con la visión de una economía descarbonizada para el año 2050 y se va trabajando hacia atrás para identificar las metas sectoriales que deben cumplirse en 2030 o 2035 para que la economía pueda alcanzar el objetivo a largo plazo (Fay et al., 2015; Waisman et al., 2019). Si bien el impacto de la pandemia sobre la actividad económica en los próximos años es especialmente drástico para los hogares, las empresas y las políticas públicas, no cambia de manera significativa la relevancia económica de elegir un futuro neutro en carbono frente a un futuro con un uso intensivo del carbono para el año 2050, lo cual es el objeto de este estudio.

Segundo, es posible que la pandemia afecte la preferencia de los consumidores y las empresas costarricenses de formas que faciliten o dificulten la descarbonización. Por ejemplo, el teletrabajo puede volverse más frecuente, pero quizás los consumidores desarrollen una mayor aversión a utilizar el transporte público superpoblado y prefieran un medio de transporte privado. Si bien el análisis de las incertidumbres presentado a continuación se realizó antes de la pandemia, es lo suficientemente amplio como para contemplar estos casos.

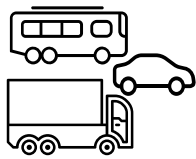
Por último, algunas medidas de descarbonización pueden desempeñar un rol clave en la reactivación económica y creación de empleo a corto plazo (Hepburn et al., 2019). Por ejemplo, es posible confirmar que las inversiones en la infraestructura del transporte público o el gasto público para facilitar la reforestación son medidas eficaces para crear empleos (Garrett-Peltier, 2017; Saget, Vogt-Schilb y Luu, 2020). La inversión en la infraestructura pública y los programas de trabajo públicos también pueden tener efectos multiplicadores en una economía deprimida. Por otro lado, los impactos fiscales y en el mercado financiero de la pandemia podrían obstaculizar la capacidad de los gobiernos latinoamericanos de realizar tales inversiones, según la respuesta que tenga la comunidad internacional (Izquierdo et al., 2020). A pesar de su relevancia para las políticas públicas, este análisis no intenta cuantificar estos temas financieros, fiscales y laborales a corto plazo. Esta iniciativa se enfoca en cuantificar los impactos a mediano y largo plazo que implementar el plan de descarbonización tiene sobre el bienestar económico de Costa Rica y las emisiones de GEI.

como una función de las reducciones de emisiones de GEI generadas por la actividad de un sector específico. En otros casos, tomamos estimaciones de fuentes costarricenses que se relacionan más directamente con las acciones propuestas en el PNdD. Al igual que con los beneficios, estas estimaciones son aproximadas y tienen gran nivel de incertidumbre.

Nos referimos a los supuestos relacionados con estas proyecciones de emisiones, beneficios y costos como **supuestos de referencia**. El Capítulo 3 presenta los resultados del modelo utilizando un único conjunto de supuestos de referencia. Proporcionamos esta estimación única de referencia para mostrar de qué modo las emisiones, los beneficios y los costos podrían evolucionar para cada sector. Esta estimación no debería interpretarse como el resultado más probable, sino como uno que es plausible según la infor-

mación conocida hoy. Para reflejar la incertidumbre sobre los impulsores futuros y la consecución de las medidas de descarbonización, desarrollamos una variedad de estimaciones para los factores del modelo y creamos un conjunto grande de **futuros plausibles**, tal como se describe a continuación. Estos futuros no deben entenderse como los más probables. No obstante, comparar los resultados del modelado entre estos futuros puede darnos una representación razonable de cómo las emisiones de GEI de Costa Rica evolucionarían con y sin el PNdD. El Capítulo 4 muestra los resultados de las emisiones, los beneficios y los costos en esta amplia gama de futuros. El Capítulo 5 describe de qué modo Costa Rica puede utilizar esta información como base para la implementación del PNdD y la actualización de la NDC de Costa Rica.

Las siguientes subsecciones de este capítulo brindan una breve descripción de cómo se modela cada sector, los principales impulsores de las emisiones, las estrategias del PNdD y su modelado, y qué beneficios y costos están representados. El Apéndice A incluye una descripción general de los modelos y parámetros utilizados para estimar las emisiones de GEI, los beneficios y los costos para cada sector.



Sector de transporte

El sector de transporte se modela utilizando una plataforma de modelado de energía de código abierto (OSeMOSYS-CR) que los investigadores de la Universidad de Costa Rica configuraron para representar el sector de energía y transporte costarricense (EPERLab, 2020; Godínez-Zamora et al., 2020). El modelo evalúa las demandas de los diferentes modos de transporte (p. ej., privado o público), la flota de vehículos con diferentes combustibles y eficiencias en el uso de combustible y las emisiones correspondientes. La plataforma OSeMOSYS-CR emplea estimaciones sobre la demanda de transporte de carga generadas por la plataforma IEEM para calcular las diferentes flotas de camiones y combustibles utilizados para satisfacer esta demanda. El modelo también incluye la posible implementación del tren de carga eléctrico desde Limón hasta Sarapiquí y la implementación del tren eléctrico para pasajeros en la Gran Área Metropolitana. Este modelo no representa patrones de flujo del tráfico geográfico. En cambio, se basa en factores que describen la distancia promedio que diferentes clases de vehículos recorren a lo largo del tiempo a nivel nacional. Consultamos a diferentes representantes del sector de transporte, mencionados en el Apéndice D.

Los principales impulsores de las emisiones generadas por el transporte pueden resumirse en los siguientes puntos:

- la demanda de transporte y elasticidad de la demanda de los diferentes medios de transporte
- la demanda de transporte de carga
- las tasas de adopción de las nuevas tecnologías, como los automóviles eléctricos
- los vehículo-kilómetros recorridos por los autobuses, los vehículos privados y los diferentes tipos de camiones
- el combustible utilizado por los vehículos
- el costo de los combustibles
- los costos de la infraestructura para la electrificación, los cambios de combustible y los cambios modales, y
- los costos de las tecnologías.

El cuadro 2.1 resume las principales acciones del PNdD para el sector de transporte y cómo estas acciones están representadas en el modelo.

El modelo OSeMOSYS-CR evalúa varios beneficios clave de la descarbonización en el sector de transporte:

Cuadro 2.1
Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector de transporte e implementación del modelo

Acciones del Plan de Descarbonización	Implementación del modelo
Electrificación de la flota pública	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en la importación de vehículos eléctricos (y la correspondiente reducción en la importación de vehículos que utilizan combustibles fósiles)
Mayor uso del transporte público en lugar de los vehículos privados	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor uso del transporte público (y la correspondiente reducción en el uso de vehículos privados)
Aumento del transporte no motorizado	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la demanda de pasajeros • Inversiones en la infraestructura para permitir la movilidad, como el tren eléctrico
Electrificación de la flota privada	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en la importación de vehículos eléctricos (y la correspondiente reducción en la importación de vehículos que utilizan combustibles fósiles)
Estabilización de la flota de motocicletas para el año 2025 y planificación de su descarbonización	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento limitado de la adopción de motocicletas en relación con las tendencias • Mayor penetración de las motocicletas eléctricas
Mayor uso de vehículos privados compartidos	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores tasas de ocupación de los vehículos privados
Extensa red de carga eléctrica o de hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Precio de los vehículos eléctricos de carga ligera, incluido el costo de la carga domiciliaria • Costo adicional del sistema de distribución para la carga de vehículos privados • Inversiones en la infraestructura de carga para los vehículos de carga pesada proporcionales al nivel de electrificación
Paso del transporte de carga de diésel a gas licuado de petróleo (GLP)	<ul style="list-style-type: none"> • Objetivo del 20 por ciento de GLP para transporte de carga en 2030 • El GLP se incluye como opción para el transporte de carga y compite con las tecnologías de electricidad e hidrógeno en los años posteriores a 2030
Reducción de las emisiones del transporte de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Penetración de los vehículos de carga eléctricos y de hidrógeno • Introducción de camiones de carga pesada a batería eléctrica y de celda de combustible de hidrógeno (semicamiones) después del año 2030
Tren de carga eléctrico de Limón	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión en la infraestructura de vías férreas y material rodante
Mejor logística para el transporte de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la demanda del transporte de carga en toneladas-kilómetros

- ahorro de energía
- mayor productividad debido a una menor congestión vehicular
- reducción en los costos médicos por accidente
- reducción de los impactos de la polución sobre la salud, y
- reducción del costo social de las emisiones de carbono, lo cual refleja los impactos del cambio climático específicos de Costa Rica.

The OSeMOSYS-CR model estimates financial benefits and costs for the transport sector through a large set of cost parameters reflecting up-front investment costs and changes in operations and maintenance costs. Additional benefits are estimated by combining benefit factors derived from other studies with modeled changes in total distance traveled by different vehicle types. For example, implementation of the NDP would lead to reduced accidents as the distance that private vehicles travel

lessens in response to greater use of public transportation. Table 2.2 summarizes the benefits and costs represented in the analysis. Appendix A provides details and numerical values.

Cuadro 2.2

Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de transporte, según lo modelado en este estudio

Beneficios de la descarbonización	Costos de la descarbonización
<ul style="list-style-type: none"> Ahorros en los costos de operaciones y mantenimiento debido al uso de vehículos de combustibles alternativos y la reducción del transporte privado Reducción en los costos médicos por accidente Mayor productividad debido a una menor congestión vehicular Ahorros en el área de salud debido a la reducción de las emisiones Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono) 	<ul style="list-style-type: none"> Cambio en los costos de capital por la adquisición de nuevos equipos e infraestructura, incluido el almacenamiento de energía (por ejemplo, baterías) El cambio en el flujo de los residuos por el paso de los vehículos convencionales a los alternativos se contempla de manera implícita en el sector de residuos



Sector de electricidad

Actualmente, el sector de electricidad en Costa Rica es renovable casi en su totalidad, basado en altos niveles de energía hidroeléctrica instalada y algunos desarrollos de energía geotérmica, eólica y solar. El PNdD incluye acciones para lograr y mantener una capacidad que sea completamente renovable para prestar apoyo a la industria y la electrificación del transporte. Para modelar el sector de transporte, utilizamos el mismo modelo que para el sector de transporte: OSeMOSYS-CR. Cabe mencionar que este modelo no resuelve los componentes geográficos de la red eléctrica. En cambio, se basa sobre supuestos acerca de las capacidades para satisfacer las demandas de electricidad señaladas en el modelo. Consultamos a diferentes representantes del sector de electricidad, mencionados en el Apéndice D.

Para estimar la demanda de electricidad correspondiente a los sectores de edificios (residenciales y comerciales), industrial y agrícola, se utilizan los modelos del sector correspondiente que se describen a continuación. Se pasan estas estimaciones de la demanda al modelo OSeMOSYS-CR, el cual también calcula la demanda de electricidad del sector de transporte. Luego, el modelo OSeMOSYS determina cuánto de la electricidad necesaria pueden aportar las fuentes renovables (y refleja una variedad de efectos plausibles sobre el cambio climático) y cuánto las fuentes de generación de electricidad que producen emisiones de carbono. Después, calcula las emisiones de GEI producidas por estas últimas fuentes. La representación del sector de electricidad hasta el año 2034 coincide con el modelado reciente del plan de expansión de la generación realizado por la empresa pública de electricidad y telecomunicaciones de Costa Rica, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). El cuadro 2.3 resume las principales acciones del PNdD para el sector de electricidad y cómo estas acciones están representadas en el modelo. El Apéndice A proporciona los detalles y los valores numéricos.

El principal objetivo de las medidas de descarbonización en el sector de electricidad es apoyar la electrificación amplia de la economía de Costa Rica empleando fuentes renovables, sin carbono y con precios competitivos. Además de contribuir a la reducción de las emisiones mediante la electrificación, el otro beneficio importante es el ahorro en el costo de la energía en los sectores en los que se utilizará más electricidad. El modelo OSeMOSYS-CR estima las fuentes de energía renovable adicionales que se requieren (así como los costos de la inversión relacionada) y los ahorros relativos a las emisiones de GEI y al costo del combustible por utilizar estas fuentes en lugar de las existentes basadas en combustibles fósiles. También contempla la generación de electricidad mediante fuentes no renovables y los costos

asociados. El cuadro 2.4 resume los beneficios y los costos de las medidas de descarbonización en el sector de electricidad. El Apéndice A proporciona los detalles y los valores numéricos.

Cuadro 2.3

Acciones del Plan de Descarbonización para el sector de electricidad e implementación del modelo

Acciones del Plan de Descarbonización	Implementación del modelo
<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar fuentes renovables, prácticamente en la totalidad de los casos • Mayor capacidad para apoyar la electrificación del transporte y la industria 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de inversiones adicionales en la capacidad eólica y solar cuando la demanda lo requiera

Cuadro 2.4

Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de electricidad, según lo modelado en este estudio

Beneficios de la descarbonización	Costos de la descarbonización
<ul style="list-style-type: none"> • Menores costos de combustible para la generación de electricidad • Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio en los costos de capital por la adquisición de nuevos equipos e infraestructura



Sector de edificios

El modelo del sector de edificios estima las emisiones de GEI de los edificios residenciales y comerciales. Para calcular las emisiones de los edificios residenciales, se combinan las estimaciones de la cantidad de hogares con las estimaciones de las tasas de uso de la energía por hogar, el porcentaje de energía utilizada correspondiente a la electricidad y los factores de carbono para el uso de energía no eléctrica. Debido a la falta de datos disponibles, el modelo del sector de edificios no hace un seguimiento del inventario de edificios comerciales; por eso, usamos la actividad económica como un indicador representativo de los edificios comerciales. Para calcular las emisiones de los edificios comerciales, se combinan las estimaciones de la actividad económica comercial con las estimaciones de las tasas de uso de la energía, el porcentaje de energía utilizada correspondiente a la electricidad y los factores de carbono en el valor agregado por dólar para el uso de energía no eléctrica. Las demandas de electricidad calculadas para el sector de edificios se pasan al modelo OSeMOSYS-CR para estimar la demanda total de electricidad. Consultamos a diferentes representantes del sector de edificios, mencionados en el Apéndice D. El cuadro 2.5 resume las principales acciones del PNDD para el sector de edificios y cómo estas acciones están representadas en el modelo.

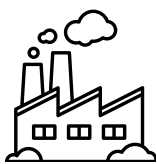
Los principales beneficios de la descarbonización en el sector de edificios se reflejan en los ahorros del costo de la energía gracias a un uso más eficiente y a la electrificación. Estimamos los costos de las adaptaciones necesarias en viviendas y edificios para utilizar más electricidad y mejorar la eficiencia (cuadro 2.6).

Cuadro 2.5**Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector de edificios e implementación del modelo**

Acciones del Plan de Descarbonización	Implementación del modelo
Reducción de las emisiones mediante la electrificación y un uso más eficiente de la energía	<ul style="list-style-type: none"> • Menor uso de energía de las viviendas • Aumento del uso de la electricidad (y la correspondiente reducción en el uso de los combustibles fósiles)
Adopción de prácticas y tecnologías de construcción de bajas emisiones	No incluido en este estudio.
Mayor uso de madera y materiales de construcción naturales	

Cuadro 2.6**Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de edificios, según lo modelado en este estudio**

Beneficios de la descarbonización	Costos de la descarbonización
<ul style="list-style-type: none"> • Ahorros de costos en el pago de los servicios de los edificios gracias a una mayor eficiencia y al cambio a la electricidad de bajo costo (en edificios residenciales y comerciales) • Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono) 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos de mejorar la eficiencia y la electrificación de las viviendas • Costos de mejorar la eficiencia y la electrificación de los edificios comerciales

**Sector industrial**

El modelo del sector industrial estima las emisiones de GEI por la energía utilizada como entradas al sector industrial (energía eléctrica y no eléctrica), las emisiones generadas por los procesos industriales (p. ej., la liberación de CO₂ causada por la manufactura de cemento) y las emisiones debidas al uso de materiales industriales, como los refrigerantes y electrónicos. El modelo IEEM proporciona estimaciones de la producción industrial futura para los tres escenarios económicos y refleja los supuestos de referencia sobre el comercio y la estructura de la economía. Un análisis más exhaustivo podría considerar de qué modo los cambios en los precios internacionales de las principales exportaciones de Costa Rica (p. ej., máquinas y suministros médicos) podrían afectar los patrones de comercio y producción industrial. Se supone que se utilizarán materias primas recicladas, como el vidrio y los metales, para reemplazar la producción de materiales vírgenes. La reducción de las emisiones por recurrir al reciclaje en lugar de la producción de materiales vírgenes se refleja en el sector de residuos, al igual que las emisiones negativas asociadas con los residuos reciclados. Esta representación de la “economía circular” garantiza que la reducción de las emisiones no se contabilice por duplicado. Las demandas de electricidad calculadas para el sector industrial se pasan al modelo OSeMOSYS-CR para estimar la demanda total de electricidad. El modelo industrial no representa firmas individuales y solo se enfoca en las principales actividades emisoras. Consultamos a diferentes representantes del sector industrial, mencionados en el Apéndice D. El cuadro 2.7 resume las principales acciones del PNDD para el sector industrial y cómo estas acciones están representadas en el modelo. El Apéndice A proporciona los detalles y los valores numéricos.

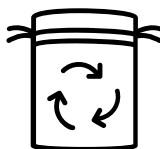
Los principales beneficios de la descarbonización industrial se reflejan en los ahorros del costo de la energía gracias a la electrificación y el incremento de la productividad por contar con mejores procesos y eficiencias. Representamos tres costos principales: los relacionados con reducir las emisiones de la manufactura de cemento, los relacionados con mejorar la eficiencia en el uso de los productos industriales y los relacionados con la eficiencia y la electrificación de todos los sectores de la industria (cuadro 2.8).

Cuadro 2.7**Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector industrial e implementación del modelo**

Acciones del Plan de Descarbonización	Implementación del modelo
Mejora de los procesos para reducir el uso de energía	<ul style="list-style-type: none"> Reducción del uso de la energía por valor agregado por sector.
Electrificación de procesos	<ul style="list-style-type: none"> Aumento del uso de la electricidad (y la correspondiente reducción en el uso de los combustibles fósiles)
Mejoras en los procesos para reducir las emisiones	<ul style="list-style-type: none"> Reducción de la intensidad de carbono en la producción industrial (particularmente, de cemento)
Mayor eficiencia del uso y reducción de las emisiones generadas por productos industriales	<ul style="list-style-type: none"> Reducción en las emisiones de los procesos por valor agregado por sector

Cuadro 2.8**Beneficios y costos de la descarbonización para el sector industrial, según lo modelado en este estudio**

Beneficios de la descarbonización	Costos de la descarbonización
<ul style="list-style-type: none"> Ahorros de costos para los productores industriales al cambiar a electricidad de bajo costo Incremento de la productividad industrial por contar con mejores procesos y eficiencias Ahorro de costos por procesar vidrio y metal reciclados en lugar de la producción de materiales vírgenes (contabilizado en el sector de residuos) Ahorros en el área de salud debido a la reducción de las emisiones Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono) 	<ul style="list-style-type: none"> Costos de reducir las emisiones por la manufactura de cemento Costos de mejorar la eficiencia y reducir las emisiones de los productos industriales (como los refrigerantes) Costos de mejorar la eficiencia y la electrificación

**Sector de residuos**

El sector de residuos emite GEI en la descomposición de los residuos sólidos y líquidos generados por las viviendas, el comercio y la industria. Un tratamiento formal de los residuos puede reducir las emisiones relacionadas. Modelamos las emisiones del sector de residuos utilizando la reconocida metodología descrita en la publicación llamada Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). El modelo considera lo siguiente:

- los residuos sólidos generados per cápita
- los residuos líquidos domésticos e industriales generados per cápita
- los residuos sólidos industriales generados por unidad producida y
- los factores de emisión de GEI neta que contabilizan las emisiones evitadas por haber reemplazado los materiales vírgenes por contenido reciclado o compostado.

Las estimaciones de las emisiones son bastante detalladas, pero no especifican comunidades ni centros de procesamiento de residuos individuales. Durante las interacciones con las partes interesadas, hablamos con diferentes representantes del sector de residuos, mencionados en el Apéndice D. El cuadro 2.9 resume las principales acciones del PNdD para el sector de residuos y cómo estas acciones están representadas en el modelo.

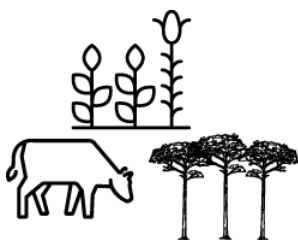
Los principales beneficios de la descarbonización en el sector de residuos están representados por el valor de los materiales reciclados, la conexión de las viviendas al servicio de alcantarillado para un adecuado tratamiento de las aguas residuales, la reducción de algunos de los impactos ambientales de las aguas residuales no tratadas y el agua reciclada que puede utilizarse como parte de una economía circular en otros sectores. La Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (PNSAR) de Costa Rica requiere muchas de estas mismas inversiones, dados estos beneficios potenciales (AyA, 2016). Estimamos los costos de recolectar y procesar los residuos para desecharlos en un vertedero, las actividades de compostaje y reciclaje, la captura de metano en los vertederos, así como los costos de rehabilitar e incrementar las conexiones de alcantarillado y capacidad de tratamiento (cuadro 2.10). Consultamos a diferentes representantes del sector de residuos, mencionados en el Apéndice D. El Apéndice A proporciona los detalles y los valores numéricos.

Cuadro 2.9
Acciones del Plan de Descarbonización para el sector de residuos e implementación del modelo

Acciones del Plan de Descarbonización	Implementación del modelo
Aumento del compostaje	<ul style="list-style-type: none"> Envío de los residuos orgánicos a instalaciones de compostaje
Implementación de la Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (PNSAR) (AyA, MINAE y MS, 2016); aumento de la cobertura del sistema de tratamiento, alcantarillado y saneamiento (según el plan nacional de saneamiento más reciente)	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de la cantidad de residuos domésticos, comerciales e industriales que se recolectan y se procesan en instalaciones de tratamiento de aguas residuales, incluido el tratamiento del total de las aguas residuales urbanas y el saneamiento en condiciones seguras en las áreas rurales para el año 2045
Mayor reciclaje	<ul style="list-style-type: none"> Envío de los materiales reciclables a instalaciones de recuperación de materiales o a su lugar de origen
Mayor uso de vertederos y captura de metano	<ul style="list-style-type: none"> Reducción de la quema de basura al aire libre, aumentar la recolección de residuos sólidos e incrementar el uso de vertederos. Además, aumentar la captura de metano en los vertederos

Cuadro 2.10
Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de residuos, según lo modelado en este estudio

Beneficios de la descarbonización	Costos de la descarbonización
<ul style="list-style-type: none"> Valor comercial de los residuos reciclados Valor del servicio de alcantarillado para los residentes Valor de recolectar y tratar las aguas residuales para el medioambiente en lugar de la descarga informal. Valor del agua reciclada para otros usos (es decir, economía circular) Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono) 	<ul style="list-style-type: none"> Recolección de los residuos sólidos Desecho de los residuos en vertederos Reciclaje y compostaje de residuos Rehabilitación o incremento de las conexiones de alcantarillado urbano y saneamiento en condiciones seguras para zonas rurales Mayor tratamiento de aguas residuales Captura del metano en los vertederos



Sector de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza

Las emisiones de GEI de los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza están interconectados y, por eso, se los suele considerar en su conjunto al planificar la descarbonización. Para esta iniciativa, modelamos cada uno de los tres sectores por separado, pero reflejamos las conexiones mediante las proyecciones que tienen en común.

Los sectores de agricultura y ganadería se modelan de forma similar. El modelo del sector agrícola estima las emisiones de GEI asociadas a los procesos de la tierra y los cultivos (p. ej., las emisiones de

la tierra, las emisiones netas de los cultivos, la aplicación de fertilizantes y la quema de residuos) y las entradas de energía no eléctrica, como el combustible utilizado por los equipos agrícolas. Las emisiones asociadas con el uso de la electricidad se reflejan en el sector de electricidad. Las emisiones de GEI para cada tipo de animal se basan en tasas de emisión por animal, las cuales se componen de factores de emisión separados para la fermentación entérica y la descomposición del estiércol. La gran mayoría de las emisiones actuales provienen del ganado vacuno y equino: un 96 por ciento.

Las emisiones de los sectores agrícola y ganadero se emplean desagregadas según las categorías de cultivos y animales mencionadas en el cuadro 2.11. El modelo no representa la heterogeneidad espacial de toda Costa Rica.

El cuadro 2.12 resume las principales acciones del PNdD para los sectores agrícola y ganadero y cómo estas acciones están representadas en el modelo.

La descarbonización de la agricultura y la ganadería se puede lograr aumentando los sumideros de carbono (por ejemplo, plantando árboles) y reduciendo las emisiones (por ejemplo, mediante usos más eficientes del fertilizante, el empleo de abonos diferentes y mejor manejo del estiércol). Los beneficios de la descarbonización en los sectores agrícola y ganadero son muchos, tal como se enumeran en el cuadro 2.13 y el Apéndice A. Los principales beneficios incluyen el aumento de rendimiento en las actividades de agricultura y ganadería. Los costos del sector agrícola se dividen entre aquellos específicos de los cafetales, según los programas existentes en Costa Rica, y todos los demás cultivos. Los costos del sector ganadero se basan en las reducciones agregadas de las emisiones de GEI, según lo indicado por los estudios académicos. Consultamos a diferentes representantes de estos sectores, mencionados en el Apéndice D.

El modelo del sector de soluciones basadas en la naturaleza considera las estimaciones de usar todo los tipos principales de tierra y evalúa la captura de emisiones asociadas por parte de los bosques, manglares y humedales, así como las emisiones liberadas o capturadas por la conversión entre las áreas

Cuadro 2.11
Categorías de cultivos y tipos de animales utilizadas en los modelos de los sectores agrícola y ganadero

Crops	Animal Types
<ul style="list-style-type: none"> • café • frutas • aceite de palma • piña • arroz • caña de azúcar • verduras • plátanos • otro 	<ul style="list-style-type: none"> • ganado de carne • ganado lechero • ganado de doble propósito • caballos • cabras • mulas • cerdos • aves • ovejas • búfalo de agua

Cuadro 2.12
Acciones del Plan de Descarbonización para los sectores agrícola y ganadero e implementación del modelo

Acciones del Plan de Descarbonización	Implementación del modelo
Reducción de las emisiones en las cadenas agrícolas primarias	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de las emisiones de carbono por área de tierra cultivada por tipo de cultivo.
Logro de emisiones bajas y sostenibilidad	
Uso de biodigestores	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de las emisiones por cabeza en el caso de los animales que forman manadas o rebaños.
Uso de tecnologías bajas en carbono para el ganado	

Cuadro 2.13

Beneficios y costos de la descarbonización para los sectores de agricultura y ganadería, según lo modelado en este estudio

Sector	Beneficios de la descarbonización	Costos de la descarbonización
Agricultura	<ul style="list-style-type: none"> Ahorros de los costos de energía por la electrificación del sector agrícola. Mayores rendimientos agrícolas gracias a prácticas mejoradas. Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono). 	<ul style="list-style-type: none"> Programas de descarbonización de los cafetales. Descarbonización no relacionada con las plantaciones de café.
Ganadería	<ul style="list-style-type: none"> Mayor productividad debido a un mejor manejo de la alimentación y del ganado, lo que puede reducir la cantidad de cabezas de ganado no productivas, por ejemplo. Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono). 	<ul style="list-style-type: none"> Costo de reducir las emisiones de carbono generadas por el ganado.

boscosas y demás tipos de tierras. Se utilizan factores de emisiones de GEI separados para representar la captura neta en las siguientes categorías de uso de la tierra:

- bosque primario y secundario de los siguientes tipos: húmedo, seco, de palmeras y manglares
- pastizales
- humedales
- asentamientos
- otros.

El cuadro 2.14 resume las principales acciones del PNdD para el sector de soluciones basadas en la naturaleza y cómo estas acciones están representadas en el modelo.

La descarbonización del sector de soluciones basadas en la naturaleza permite aumentos en una variedad de servicios ecosistémicos que pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Provisión de materiales o productos renovables:** En el caso de los bosques húmedos, el principal valor proviene del material genético, la energía hidroeléctrica y otros productos del bosque. En el caso de los manglares, el principal valor proviene de los alimentos y otros productos.
- **Gestión del ecosistema:** En el caso de los bosques húmedos, el principal valor proviene del manejo de la erosión, la regulación del clima y la filtración y purificación del agua. En el caso de los manglares, un valor importante está dado por la preservación de la biodiversidad, la protección contra los eventos extremos, la prevención de la erosión y la regulación del clima.

Cuadro 2.14

Acciones del Plan Nacional de Descarbonización para el sector de soluciones basadas en la naturaleza e implementación del modelo

Acciones del Plan de Descarbonización	Implementación del modelo
Mantenimiento y aumento de la cobertura de áreas boscosas	<ul style="list-style-type: none"> Eliminación de la deforestación de los bosques primarios. Aumento de las tasas de captura de carbono de las áreas boscosas.
Restauración y protección de las zonas costeras y rurales	<ul style="list-style-type: none"> Eliminación de la deforestación de los manglares primarios. Aumento de las tasas de captura de carbono de las áreas cubiertas por manglares y humedales.

- **Apoyo cultural:** Los bosques húmedos y los manglares tienen un importante valor para el turismo y recreación.

Los costos están representados por los costos de oportunidad al no deforestar y los costos requeridos para aumentar la captura neta de los bosques existentes (cuadro 2.15).

Cuadro 2.15

Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de soluciones basadas en la naturaleza, según lo modelado en este estudio

Beneficios de la descarbonización	Costos de la descarbonización
<ul style="list-style-type: none"> • Servicios ecosistémicos de los bosques húmedos, secos y de manglares. • Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono). 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de oportunidad por la madera perdida. • Costo de oportunidad por los pastizales perdidos. • Costo de oportunidad por la producción agrícola perdida. • Aumento de la captura de carbono por parte de los bosques.

Consideración de la incertidumbre respecto a emisiones y descarbonización en el futuro

No es probable que los supuestos de referencia se den exactamente tal como se anticipan hoy. Por lo tanto, existe incertidumbre respecto a qué evolución tendrán las emisiones en el futuro sin la descarbonización. La incertidumbre sobre las estimaciones del modelo respecto a emisiones futuras se debe a lo siguiente: (1) información poco precisa o incompleta sobre las emisiones actuales, como las tasas de emisión del ganado vacuno o de la manufactura de cemento; (2) incertidumbre sobre la evolución de los impulsores de emisiones, como la cantidad de cabezas de ganado o la cantidad y el tipo de manufactura en el futuro; (3) incertidumbre sobre cómo podrían cambiar los procesos que generan emisiones, como el uso de los bosques y las tasas de captura; (4) falta de precisión al promediar los efectos de los diferentes sectores, tales como las tasas promedio representativas del uso de la energía por vivienda o las acciones relacionadas con la agricultura y la ganadería en todo el territorio de Costa Rica en lugar de desagregar los resultados por municipios o regiones, y (5) la fórmula de modelado específica empleada para hacer la estimación.

También existe incertidumbre sobre la efectividad que puedan tener las medidas de descarbonización. Por ejemplo, el PNdD establece objetivos para la adopción de vehículos eléctricos, pero no hay garantía de que esos objetivos se cumplan. El PNdD también busca asegurar que la electricidad se genere utilizando fuentes renovables, como la energía hidroeléctrica, eólica y solar. En particular, la cantidad de energía hidroeléctrica disponible podría reducirse debido a los efectos inciertos del cambio climático.

Además, existe incertidumbre en torno a los factores de costo y beneficio utilizados para calcular los beneficios netos del plan de descarbonización. En muchos casos, no se cuenta con factores de beneficio o costo específicos para Costa Rica, por lo que los valores se derivan de otras regiones. También hay beneficios y costos de la descarbonización que no se incluyen en este estudio. Por ejemplo, los beneficios económicos del empleo no se incluyen ni tampoco los muchos beneficios intangibles que

las medidas de descarbonización producen en cuanto a las mejoras en la calidad de vida. En algunos casos, los datos no estaban disponibles, como los costos directos de reducir las emisiones en el sector de edificios y, por eso, se usaron estimaciones. En consecuencia, algunos costos y beneficios pueden estar sub o sobreestimados.

Hay más de 125 incertidumbres definidas en los modelos que utilizamos para estimar las emisiones en todos los sectores. El cuadro 2.16 resume las incertidumbres relacionadas con los impulsores de emisiones que son independientes de la implementación del PNdD (llamadas incertidumbres de los impulsores) y las incertidumbres sobre la implementación del PNdD (llamadas incertidumbres de la descarbonización). Hay otros 47 factores adicionales que se utilizaron para estimar los costos y los beneficios del PNdD. Tales factores se resumen en las secciones anteriores, en los cuadros 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 2.10, 2.13 y 2.15.

Para reflejar estas incertidumbres, desarrollamos varios miles de futuros explorando la incertidumbre: cada futuro refleja un conjunto de supuestos sobre los parámetros inciertos. Estas estimaciones se desarrollaron antes de la propagación del COVID-19. No obstante, hay estudios recientes que sugieren que las reducciones relacionadas con la pandemia probablemente serán temporales (Forster et al., 2020). Por eso, cualquier impacto sobre las actividades económicas a largo plazo puede reflejarse adecuadamente en un rango razonable de tasas de crecimiento económico promedio a largo plazo, tal como hemos hecho en este estudio (ver también el cuadro anterior). Luego, usamos la herramienta CR-IDPM para evaluar las emisiones de GEI y los costos y beneficios de la descarbonización para cada futuro.

Para desarrollar el conjunto de futuros, primero utilizamos la plataforma IEEM para plantear tres futuros económicos basados en las siguientes tasas de crecimiento económico: 2; 3,5 y 4 por ciento al año. La tasa de crecimiento económico de referencia de 2021 a 2050 se basa en estimaciones del Fondo Monetario Internacional (2019), según las cuales el producto bruto interno de Costa Rica crece un 3,5 por ciento para el período que va de 2020 a 2050, y fijamos los valores menor y mayor para explorar un rango más amplio de tasas. Cada futuro incluye estimaciones internamente coherentes de los impulsores de emisiones, tales como la demanda de transporte y el valor agregado de diferentes industrias, cultivos y ganado. Luego, correlacionamos estos datos con entradas específicas para los diferentes modelos sectoriales. Combinamos estos tres futuros económicos con los supuestos de referencia para todos los parámetros resumidos en el cuadro 2.13 y especificamos la no implementación del PNdD. A estos futuros, los llamamos Futuros 1 a 3.

Luego, desarrollamos una muestra de 1.000 elementos en los rangos plausibles para las demás incertidumbres de los impulsores resumidas en el cuadro 2.16 y las incertidumbres de los costos y los beneficios descritas en los cuadros del 2.2 al 2.15 para agregar al futuro de referencia. Empleamos un enfoque llamado muestreo por hipercubo latino (LHS) para garantizar que los arreglos de futuros resultantes con los 1.000 elementos representaran eficientemente todos los rangos plausibles de las incertidumbres consideradas. Los rangos plausibles para cada impulsor se establecieron sobre la base de la literatura o, si no había información sobre la incertidumbre disponible, simplemente un rango de porcentaje estándar en torno a la mejor estimación. Combinamos estos 1.000 futuros con los tres escenarios económicos para definir los Futuros del 4 al 3.003. Estos tampoco suponen la implementación del PNdD.

Luego, desarrollamos tres experimentos para representar la implementación del PNdD con supuestos de referencia para los tres escenarios de tasas de crecimiento económico (experimentos 3.004 a 3.006). Nuevamente, desarrollamos una muestra LHC de 1.000 elementos, esta vez variando las incertidumbres de los impulsores y las incertidumbres de la descarbonización. Combinamos estos 1.000 futuros con los tres escenarios de tasas de crecimiento económico para obtener otros 3.003

experimentos (Futuros del 3.007 al 6.006) que reflejan la implementación del PNDD. El cuadro 2.17 resume este diseño experimental.

Cuadro 2.16
Resumen de las incertidumbres en los modelos de emisión

Sector	Incertidumbres de los impulsores	Incertidumbres de la descarbonización
Todos	<ul style="list-style-type: none"> Tasa de crecimiento económico 	<ul style="list-style-type: none"> No disponible
Movilidad y transporte	<ul style="list-style-type: none"> Demanda de transporte (vinculada al crecimiento económico) Costo de los combustibles Costos de infraestructura para la electrificación, cambios de combustible y cambios modales Costos tecnológicos Elasticidad de la demanda de los diferentes medios de transporte Tasas de adopción de nuevas tecnologías 	<ul style="list-style-type: none"> Crecimiento del transporte público eléctrico y de hidrógeno Crecimiento del transporte eléctrico privado y de carga Crecimiento del transporte de hidrógeno de carga pesada Crecimiento de la proporción del transporte no motorizado y del uso del transporte público
Electricidad	<ul style="list-style-type: none"> Costo de las nuevas energías renovables 	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollo de nuevas energías renovables para satisfacer la creciente demanda Producción de las instalaciones de energía hidroeléctrica
Edificios	<ul style="list-style-type: none"> Población Tasas de ocupación de las viviendas Actividad económica comercial 	<ul style="list-style-type: none"> Uso de la energía de las viviendas Porcentaje de electrificación de los hogares Uso de energía por cantidad de actividad económica Porcentaje de electrificación comercial
Industria	<ul style="list-style-type: none"> Producción de cemento y otros productos industriales Tasas de descarbonización del cemento y otros productos industriales Valor industrial añadido 	<ul style="list-style-type: none"> Tasas de descarbonización del cemento y otras producciones industriales (incertidumbre tanto del impulsor como de la descarbonización) Demanda de energía por valor Eficiencia del uso de energía no eléctrica Aumento de la electrificación de la actividad industrial
Residuos	<ul style="list-style-type: none"> Población Actividad industrial Residuos per cápita y por valor de la producción industrial 	<ul style="list-style-type: none"> Proporción de residuos que se reciclan y se convierten en abono Porcentaje de aguas residuales tratadas Metano capturado en los vertederos
Agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza	<ul style="list-style-type: none"> Valor agregado de la agricultura y la ganadería Cambio en la superficie utilizada para el cultivo y el pastoreo 	<ul style="list-style-type: none"> Eficiencia energética en la agricultura y la ganadería Grado de electrificación de las actividades agrícolas y ganaderas Cambio en la intensidad de GEI de la producción agrícola Cambio en las emisiones de GEI proveniente de animales y estiércol Tasas de deforestación de los bosques primarios Cambio en la captura de carbono por bosques húmedos, secos, de palmeras y manglares

Cuadro 2.17**Diseño experimental para evaluar las emisiones de GEI, los beneficios y los costos en condiciones de incertidumbre**

Futuros	Tasa de crecimiento económico	Otras incertidumbres de los impulsores	Incertidumbres de la descarbonización	Incertidumbre de los beneficios y los costos
1 a 3	Baja, de referencia, alta	Supuestos de referencia	No disponible	Supuestos de referencia
4 a 3003	Baja, de referencia, alta	Muestra LHS de 1.000 elementos	No disponible	Muestra LHS de 1.000 elementos
3004 a 3006	Baja, de referencia, alta	Supuestos de referencia	Supuestos de referencia	Supuestos de referencia
3007 a 6006	Baja, de referencia, alta	Muestra LHS de 1.000 elementos		

Identificación de las vulnerabilidades para brindar fundamento a la implementación del Plan Nacional de Descarbonización

Evaluamos las emisiones, los beneficios y los costos del PNdD en miles de futuros plausibles para hacer primero una estimación aproximada de cuáles son los rangos de resultados. ¿Podría Costa Rica buscar un objetivo poco realista o poco ambicioso en cuanto a lograr cero emisiones netas? ¿Cuál sería la diferencia con el objetivo ideal? ¿Qué rango de beneficios netos podrían conseguirse? Segundo, queremos entender qué condiciones futuras podrían hacer que la estrategia de descarbonización de Costa Rica no logre sus objetivos. Luego, esta información se usa para tomar decisiones sobre cómo implementar el PNdD con cierta flexibilidad para garantizar el éxito independientemente de cómo se desarrolle el futuro. Tales resultados se presentan en el Capítulo 4.

Empleando técnicas de análisis de la vulnerabilidad extraídas de la literatura de RDM (Groves y Lempert, 2007; Bryant y Lempert, 2010), definimos un umbral para las emisiones de GEI, por encima del cual indicaría que Costa Rica no alcanzó sus objetivos de descarbonización. De manera similar, definimos otro umbral para los beneficios económicos netos. El análisis de la vulnerabilidad identifica vulnerabilidades clave, definidas según los rangos de incertidumbres específicas que ocasionan resultados inferiores a los esperados. En el Capítulo 5, vemos estrategias de modelado y delimitación que Costa Rica podría utilizar para garantizar una adecuada implementación del PNdD.

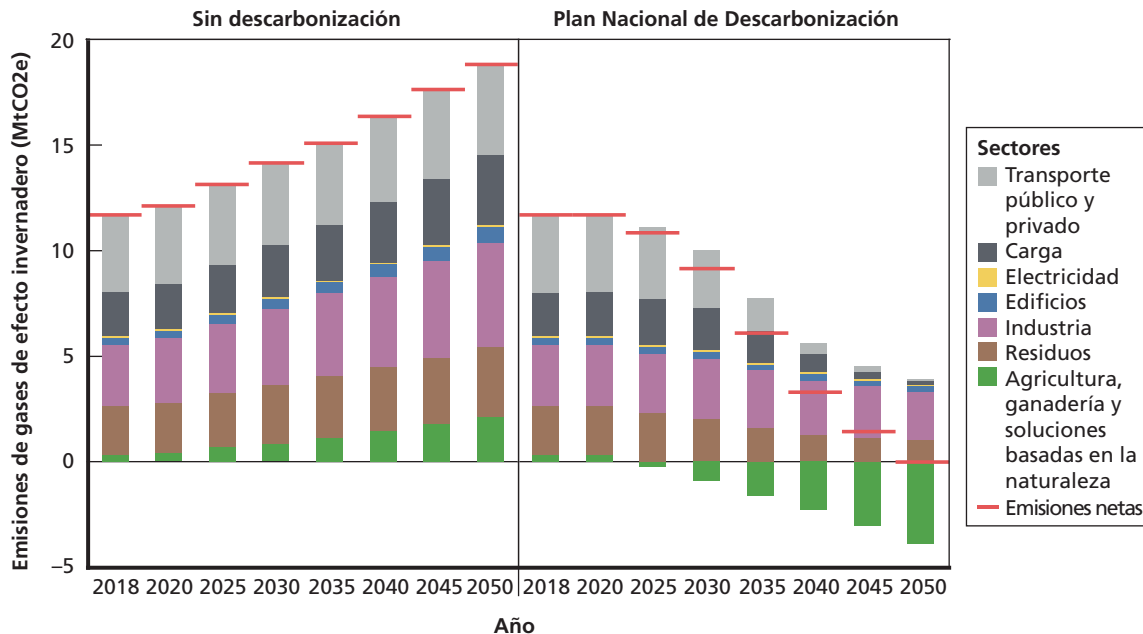
Los costos y beneficios del Plan de Descarbonización de Costa Rica, considerando supuestos estándares

Costos y beneficios generales de descarbonizar la economía de Costa Rica

Si Costa Rica implementa correctamente su PNdD, estimamos que las emisiones netas se reducirían en todos los sectores de aproximadamente 11,7 megatonnes de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) en 2018 a 0 MtCO₂e en 2050, según los supuestos de referencia. Sin la implementación del PNdD, las emisiones aumentarían a 18,8 MtCO₂e para el año 2050. El gráfico 3.1 muestra estos resultados desagregados por sector. Para los resultados presentados aquí, agrupamos los sectores de transporte público y privado, dado que algunas acciones del sector público, tales como mejorar el transporte público, hacen que se reduzcan las emisiones de los vehículos privados y genera beneficios tales como una menor congestión de tráfico. También agrupamos los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza porque el uso de la tierra los afecta a los tres.

Las reducciones más importantes de las emisiones netas se darían en el sector de transporte: una reducción de 4,2 MtCO₂e en los sistemas de transporte público y privado y otras 3,2 MtCO₂e en el

Gráfico 3.1
Emisiones GEI en Costa Rica, por sector, a lo largo del tiempo, sin descarbonización (izquierda) y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización (derecha) según los supuestos de referencia



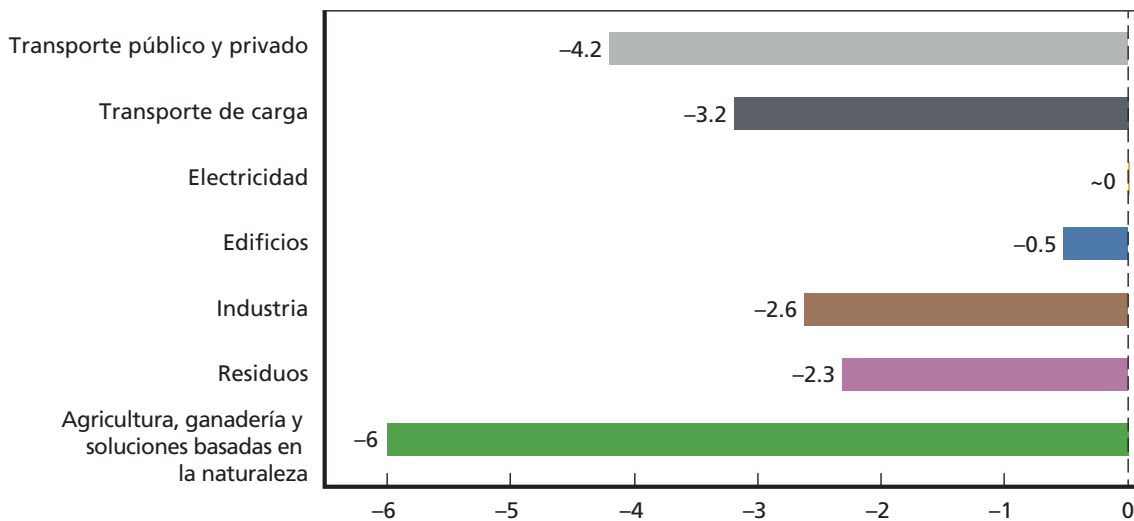
transporte de carga (gráfico 3.2). También se produciría una reducción significativa en los sectores agrícola, ganadero y forestal: 6 MtCO_{2e} para el año 2050, siendo el único sector con absorción neta. Las reducciones en los sectores industrial y de residuos suponen una quita adicional de 4.9 MtCO_{2e}. El sistema de electricidad actual es renovable prácticamente en su totalidad y cuenta con un importante exceso de capacidad. Por eso, si bien las reducciones de las emisiones no provienen directamente del sector de electricidad, la actual capacidad renovable del sector de electricidad será fundamental para apoyar un importante grado de descarbonización en otros sectores mediante la electrificación.

Según los supuestos de referencia, implementar el PNdD permitiría ahorrar o generaría de algún otro modo \$75 mil millones en beneficios entre los años 2020 y 2050, descontados hasta el presente a una tasa del 5 por ciento anual. El costo descontado sería de \$34 mil millones, con un beneficio neto de \$41 mil millones.¹

El gráfico 3.3 muestra cómo los beneficios y los costos se acumulan a lo largo del tiempo, presentado en términos de siete cortes temporales. La mayor clase de beneficios se debe a los ahorros en los costos gracias a la electrificación y la eficiencia. Esto incluye menores costos de combustible en el sector de transporte debido a la adopción de vehículos eléctricos y de hidrógeno. También incluye ahorros en los costos de energía en los sectores de edificios e industria. La categoría beneficios económicos incluye los beneficios que no son los de menores costos de la energía por la electrificación que se trasladan directamente a las personas y las empresas, como los ahorros en cuestiones de salud y una mayor productividad. Los servicios ambientales incluyen beneficios de los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza, tales como proporcionar plantas para medicamentos, alimentos para las comunidades que viven en zonas boscosas y controlar la erosión y el filtrado de los suministros de agua. Una economía circular incluye los beneficios de reciclar los materiales y reutilizar las aguas residuales.

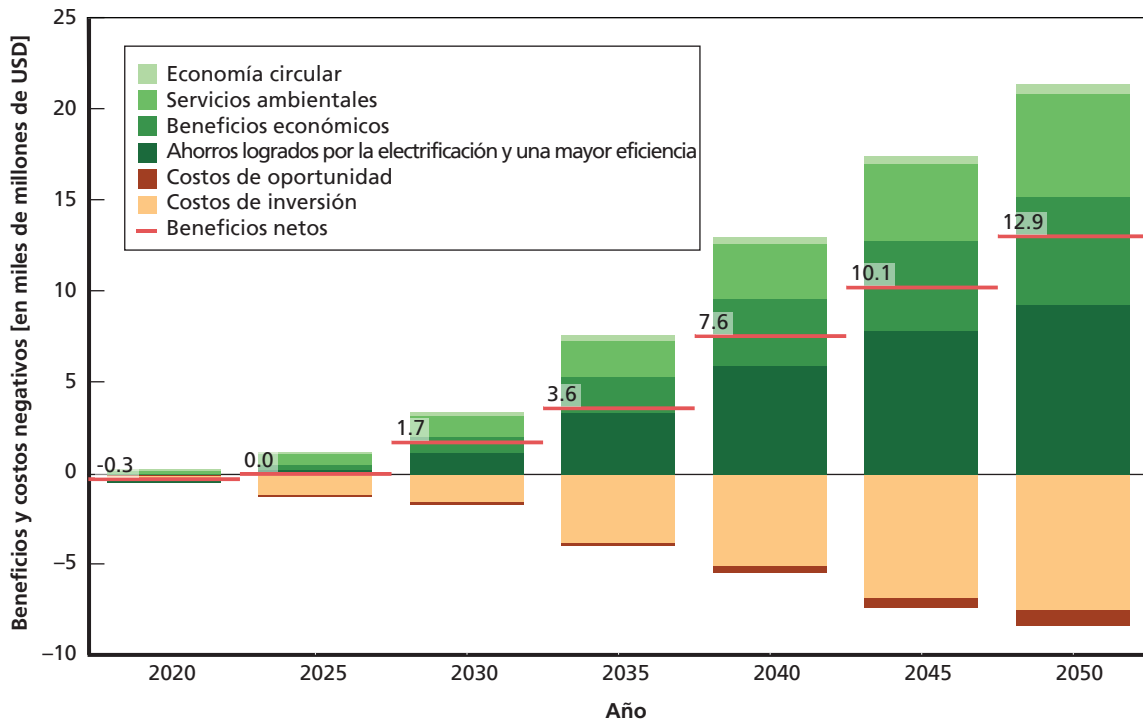
Gráfico 3.2

Reducción en las emisiones de Costa Rica para el año 3050, con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización, según los supuestos de referencia



¹ El 5 % anual es la tasa sugerida por el Banco Central de Costa Rica y coincide con el valor de guía propuesto por Coppola, Fernholz y Glenday (2014).

Gráfico 3.3
Los costos y beneficios anuales del Plan de Descarbonización de Costa Rica según los supuestos de referencia, por sector

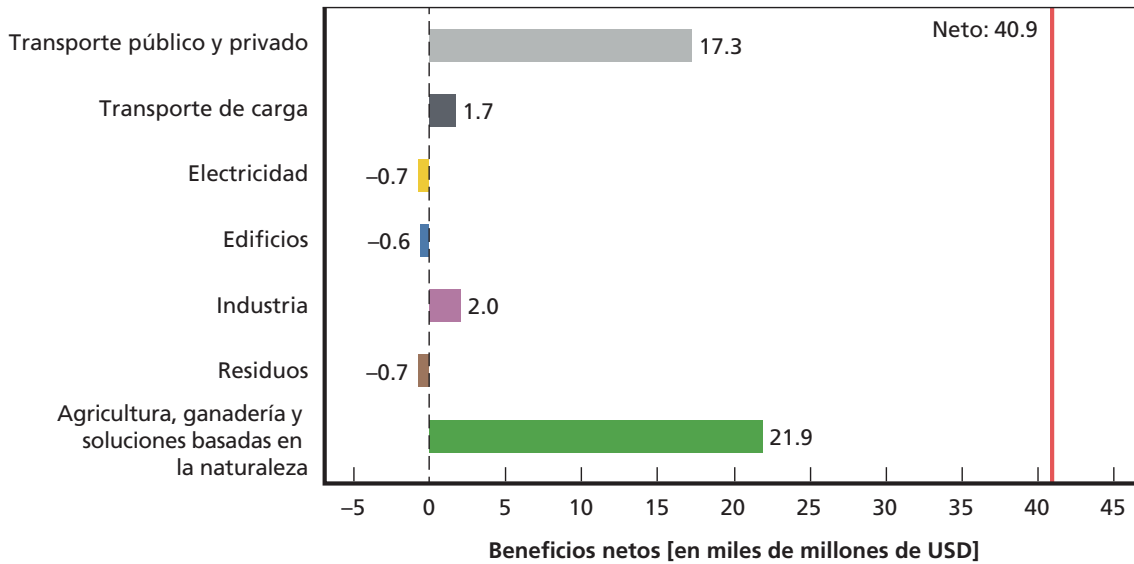


Para implementar el PNdD, Costa Rica incurrirá en costos de inversión y costos de oportunidad. Los costos de inversión incluyen los necesarios para pasar al uso de movilidad eléctrica, mejorar el transporte público, comprar equipos que hacen un uso eficiente de la energía y convertir la energía de los edificios para que usen electricidad. Los costos de inversión a corto plazo quedan rápidamente compensados por los beneficios.² Los costos de oportunidad incluyen aquellos relacionados con la conservación de los bosques primarios en lugar de utilizar la tierra para producción de madera o agricultura y ganadería.

Si analizamos los beneficios y costos juntos, observamos que los mayores beneficios netos se dan en los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza: alrededor de \$22 mil millones (gráfico 3.4). Le siguen el sector de transporte público y privado, que generaría \$17 mil millones en beneficios netos según los supuestos de referencia, mientras que el sector industrial y el de residuos lograrían beneficios netos menores (\$1.400 millones, tomados en conjunto). Dada la forma en que se contabilizan los costos y los beneficios en los diferentes sectores, los beneficios netos en el sector de electricidad son ligeramente negativos. No obstante, los beneficios de una electricidad más económica se contabilizan en los sectores de transporte, edificios e industria. Los beneficios netos del sector de edificios también son ligeramente negativos según los supuestos de referencia. Sin embargo, las estima-

² En una economía en la cual los factores de producción no se utilicen en su totalidad, tal como sea quizás el caso de Costa Rica después de los impactos de la pandemia, las inversiones financiadas por deuda pública pueden, en ciertas condiciones, contribuir a reactivar la economía y recuperar por sí mismas los importes desembolsados (Riera-Crichton, Vegh y Vuletin, 2014; Fondo Monetario Internacional, 2019). Este estudio no considera ese impacto: todas las inversiones se consideran como costos netos.

Gráfico 3.4
Beneficios netos descontados total de la implementación del Plan Nacional de Descarbonización según los supuestos de referencia, por sector



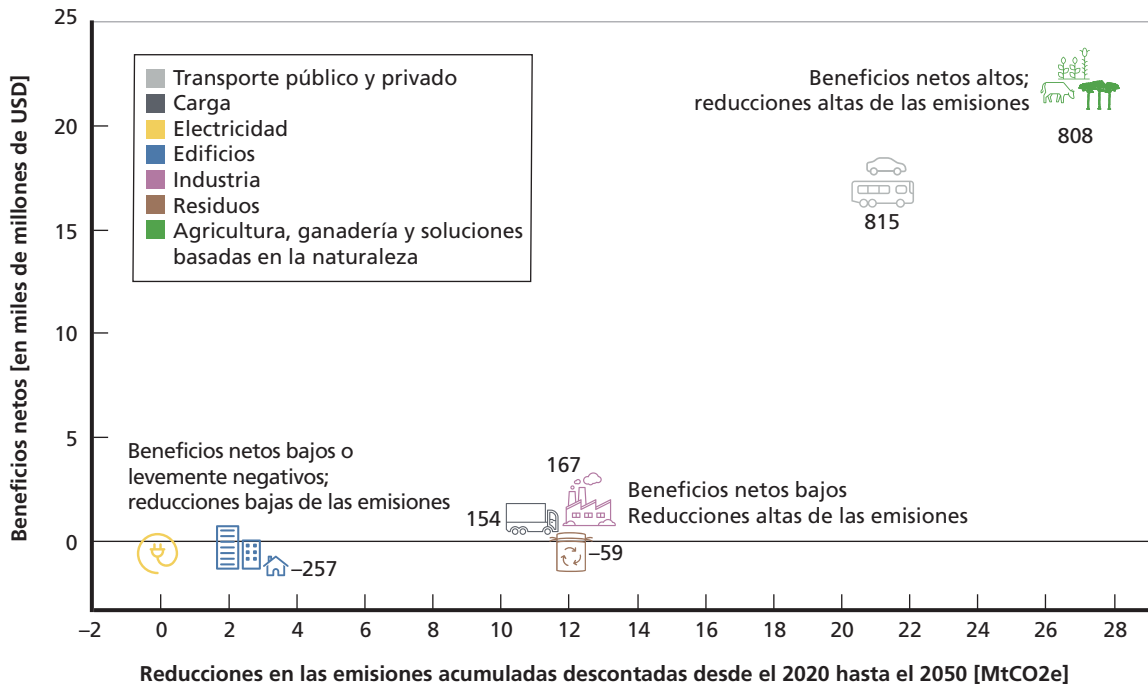
ciones de beneficios y costos son aproximadas, tal como se menciona a continuación, y los beneficios netos podrían ser ligeramente positivos si se consideran otros supuestos diferentes.

La incertidumbre en torno a los factores de costos y beneficios puede ser muy alta, y es posible que algunos costos y beneficios no se hayan incluido en el análisis. Por ejemplo, nuestras estimaciones sobre los costos de implementar la eficiencia energética en los edificios se basan en pruebas particularmente débiles. Además, incluso aunque los costos enumerados para un eje de acción determinada superen a sus beneficios, es posible que las reducciones de emisiones de este eje de acción no puedan reemplazarse fácilmente por otras que se obtengan mediante otras acciones. También puede suceder que Costa Rica retrase algunas de las inversiones necesarias hasta que sean menos costosas. Por último, algunos cambios en las acciones del PNdD en los diferentes ejes de acción del plan podrían reducir los desequilibrios entre los beneficios y los costos, tal como se explica en el Capítulo 5.

Cabe destacar que no es necesario traducir los costos asociados con un eje de acción determinada en costos para los actores económicos de ese sector. La distribución de los costos y beneficios entre los consumidores y las firmas depende básicamente las políticas del gobierno, lo cual no se considera en este estudio. Por ejemplo, el gobierno puede hacer uso de la política fiscal u otros mecanismos para transferir algunas de las ganancias hacia quienes incurran en costos netos por el PNdD.

Cuando observamos las emisiones y los beneficios netos en conjunto por sectores, vemos claramente que unos pocos sectores permiten obtener grandes reducciones de las emisiones y beneficios económicos netos significativos en agricultura, soluciones basadas en la naturaleza, ganadería y transporte público y privado (gráfico 3.5). Los beneficios netos por cantidad de emisiones acumuladas descontadas también son mayores para estos sectores: \$808 por tonelada de CO₂ equivalente (CO₂e) y \$815 por tonelada de CO₂e. Las acciones realizadas en los sectores de transporte de carga, industria y residuos permiten obtener grandes reducciones en las emisiones de GEI, pero menores beneficios netos. El beneficio por unidad también es significativamente menor que en los sectores mencionados antes. Por último, las medidas de descarbonización en los sectores de electricidad y edificios darían lugar a reducciones de emisiones mucho menores y a costos netos modestos.

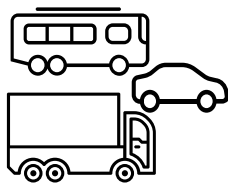
Gráfico 3.5
Beneficios netos y reducción de emisiones, descontados entre 2020 y 2050, por sector



NOTA: Los números indican los beneficios netos por reducción de emisiones acumuladas descontadas (USD por tonelada de CO₂e). No se proporciona ningún valor para el sector de electricidad debido a que los beneficios netos y las reducciones de emisiones son valores muy pequeños.

Detalle sector por sector de las emisiones, beneficios y costos

Las siguientes subsecciones presentan información detallada sobre cada sector para de examinar cómo se reducen las emisiones, así como los beneficios y costos individuales que se acumulan a lo largo del tiempo según los supuestos de referencia.



Sector de transporte

Según los supuestos de referencia y la implementación del PNdD, las emisiones de transporte se reducirían de 5,7 MtCO₂e en 2018 a 0,3 MtCO₂e en 2050, a un costo descontado de \$24 mil millones. Estas reducciones permitirían obtener \$30 mil millones en ahorros de costos descontados y unos \$13 mil millones en ahorros por temas de salud, accidentes y congestión de tráfico.

La implementación del PNdD generaría reducciones de las emisiones en el transporte público, privado y de carga (gráfico 3.6). En el sector de transporte privado, las emisiones se eliminarían porque la flota estaría completamente electrificada. El transporte público y de carga, por su parte, mantendría tasas bajas de emisiones de GEI en el año 2050.

La descarbonización en el sector de transporte generaría beneficios que superarían con creces los costos (gráfico 3.7). Los principales beneficios provendrían de los menores costos de mantenimiento y operación gracias a que la flota estaría mayormente electrificada: \$14.400 millones del transporte público y privado, \$12.300 millones del transporte de carga y otros \$3.600 millones del sistema de transporte en su conjunto. La siguiente categoría en cuanto a importe de los beneficios es la reducción

en los costos asociados a polución, accidentes y congestión vehicular: unos \$11 mil millones. La mayoría de los beneficios se originan en la menor cantidad de accidentes, dado que habría menos vehículos privados en la calle y que recorrerían distancias menores, ya que la movilidad pasaría a opciones de transporte público, instrumentadas mediante inversiones en mejores líneas de autobuses, tren eléctrico y opciones de movilidad no motorizada.

Gráfico 3.6
Emisiones del sector de transporte sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización

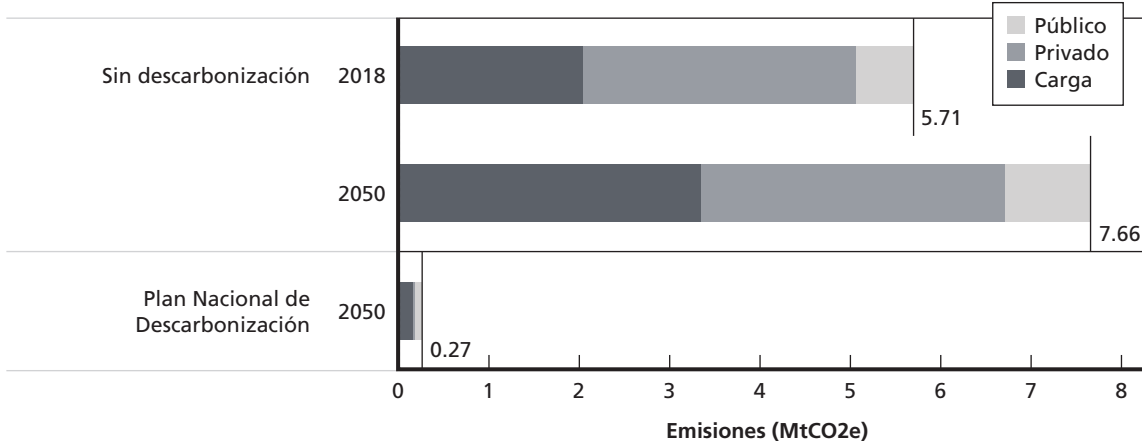
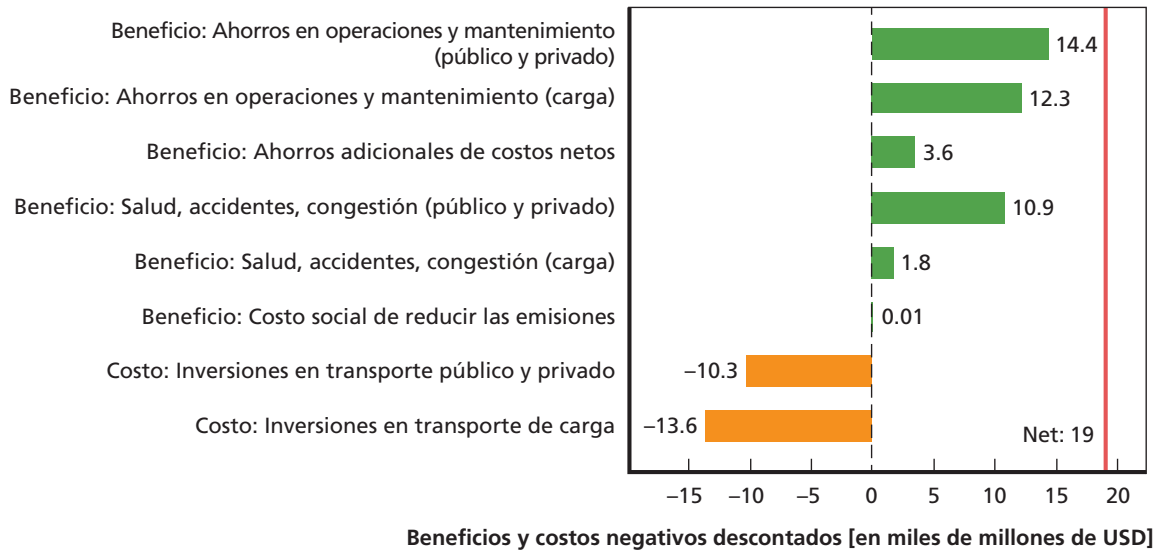


Gráfico 3.7
Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de transporte, según los supuestos de referencia





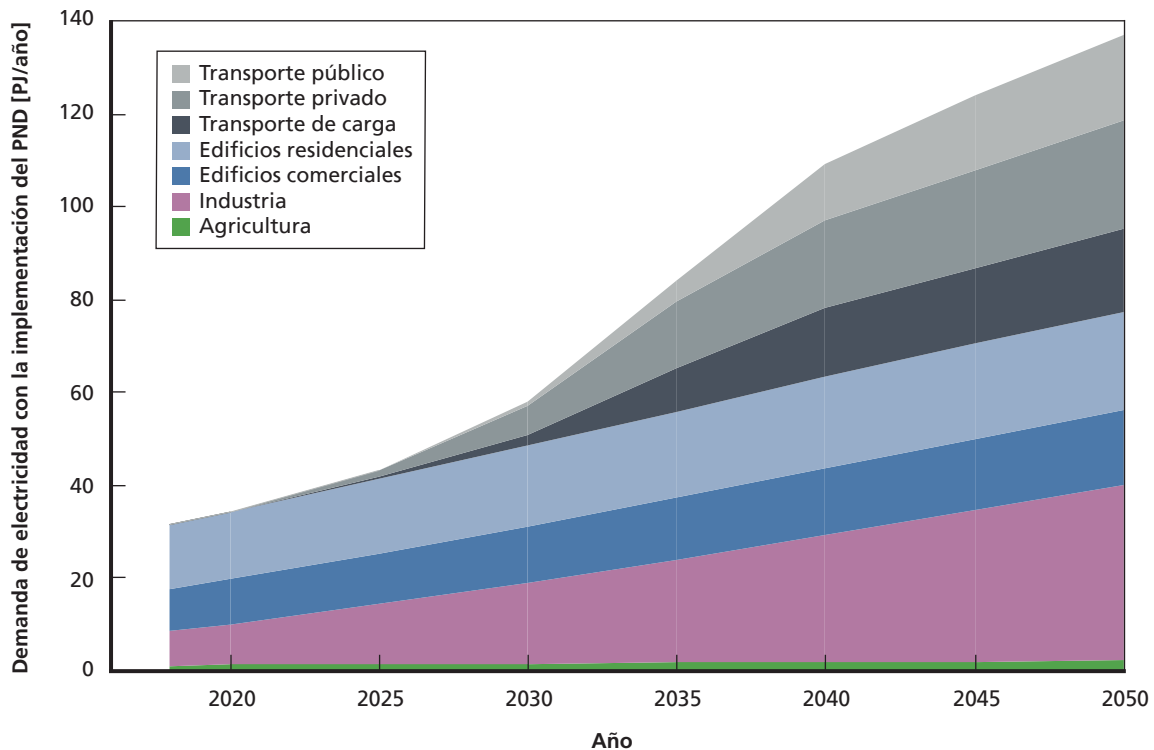
Sector de electricidad

Según los supuestos de referencia y con la implementación del PNdD, las emisiones del sector de electricidad permanecerían cercanas a cero hasta el año 2050, dado que las fuentes renovables siguen aportando electricidad libre de carbono. Solo se requerirían inversiones modestas inferiores a mil millones de dólares hasta el año 2050 para mantener el alto nivel de capacidad renovable.

El sistema eléctrico costarricense tiene actualmente exceso de capacidad renovable gracias a una infraestructura de energía hidroeléctrica altamente desarrollada. Mientras Costa Rica electrifica el transporte y otros sectores, este exceso de capacidad permitirá reemplazar el combustible a muy bajo costo. La diferencia en las emisiones relacionadas con la generación de energía entre los escenarios “sin descarbonización” y “con la implementación del PNdD” es muy pequeña: menos de 0,08 MtCO₂e al año entre 2040 y 2050. De manera similar, los costos netos son bajos debido a los costos de inversión modestos: unos \$700 millones de costos descontados desde 2020 a 2050. Cabe mencionar que el beneficio en términos de energía más económica para el transporte, los edificios y la industria se contabiliza en cada una de los ejes de acción, respectivamente.

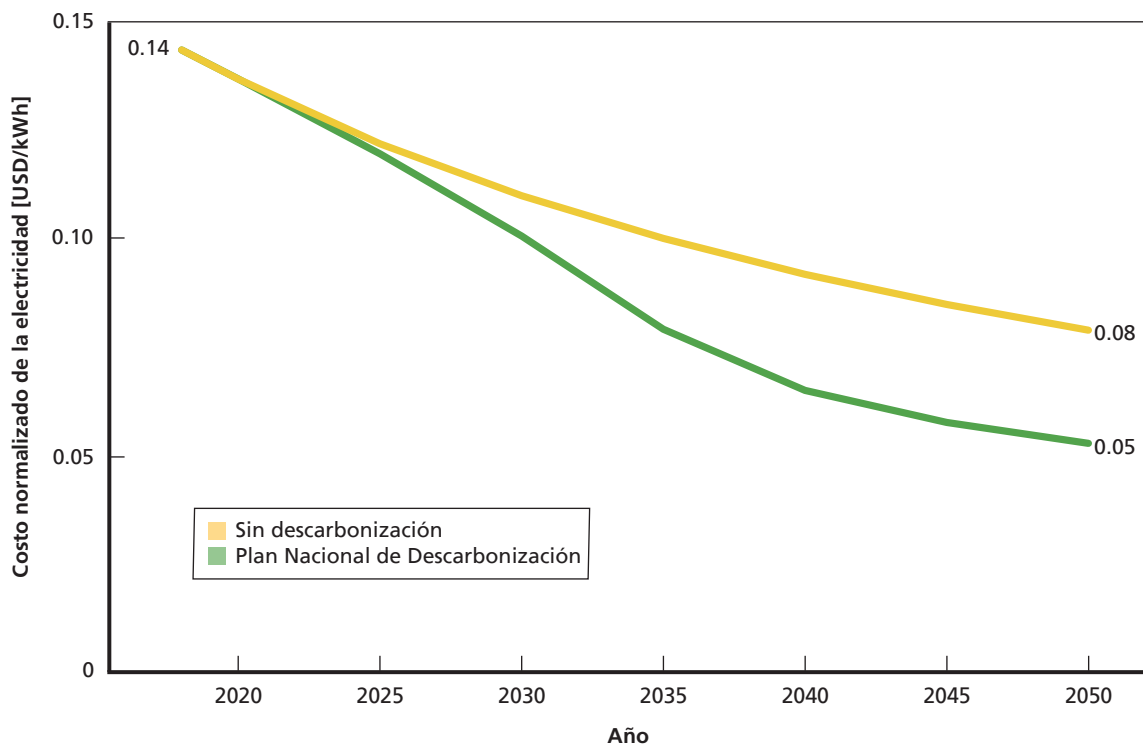
La implementación del PNdD aumenta el consumo de electricidad (gráfico 3.8). En 2018, el uso de la electricidad era de alrededor de 31 petajulios (PJ) al año, y aumenta a casi 140 PJ por año según los supuestos de referencia. Los mayores aumentos provienen de la electrificación del transporte público, privado y de carga, y de la industria. La demanda de electricidad por parte de los edificios sigue siendo aproximadamente constante, dado que los aumentos por la electrificación se compensan con un uso más eficiente de la energía.

Gráfico 3.8
Cambio en el consumo de electricidad por parte de los sectores de transporte, edificios, industria y agricultura



La mayor demanda de electricidad se satisface, en gran parte, a través de la energía hidroeléctrica existente. En consecuencia, el costo normalizado de la electricidad se reduce a lo largo del tiempo a un ritmo más rápido con la implementación del PNdD que sin ella: desde \$0,14 por kilovatio hora (\$/kWh) a \$0,05/kWh (gráfico 3.9). Para el año 2050, estimamos que el costo de generar electricidad se reduciría en un 38 por ciento con la implementación del PNdD y en un 79 por ciento en relación con 2018, según los supuestos de referencia. Este beneficio se contabiliza dentro de los ahorros por la electrificación en los sectores de transporte, edificios e industria. Las reglamentaciones actuales en Costa Rica exigen que las tarifas eléctricas se basen en sus costos normalizados. En nuestros resultados, vemos que, en virtud de este arreglo, la implementación del PNdD haría que se reduzcan las tarifas eléctricas para los consumidores y las firmas.

Gráfico 3.9
Costo normalizado de la electricidad a lo largo del tiempo sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización



Sector de edificios

Según los supuestos de referencia y la implementación del PNdD, las emisiones del sector de edificios se reducirían en un 42 por ciento para el año 2050, a un costo de unos \$2.400 millones. Las inversiones para la descarbonización generarían unos \$1.800 millones en ahorros en el costo de la energía para los propietarios u ocupantes de edificios residenciales y comerciales, lo cual no compensa plenamente los costos de inversión más altos previstos en nuestro escenario de referencia.

Las emisiones del sector de edificios son relativamente bajas en comparación con las de otras fuentes: solo unas 0,4 MtCO₂e en 2018. Según los supuestos de referencia y el PNdD, las emisiones de

edificios residenciales y comerciales se reducirían en un 42 por ciento (gráfico 3.10). La tasa de reducción de las emisiones en ambos tipos de edificios es similar.

Los beneficios de la descarbonización en el sector residencial provienen principalmente de los ahorros en el costo de la energía para los clientes de edificios residenciales y comerciales (gráfico 3.11). Si bien los costos para el sector comercial son difíciles de estimar, son considerablemente mayores, tomando en cuenta los supuestos de referencia. Disponer de mejores estimaciones sobre estos costos, basadas en inventarios de los edificios con características detalladas que actualmente no están disponibles, podría mejorar nuestra evaluación de los beneficios netos del sector de edificios. El análisis de incertidumbre que se describe en el Capítulo 4 explora supuestos alternativos.

Gráfico 3.10
Emisiones del sector de edificios sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización

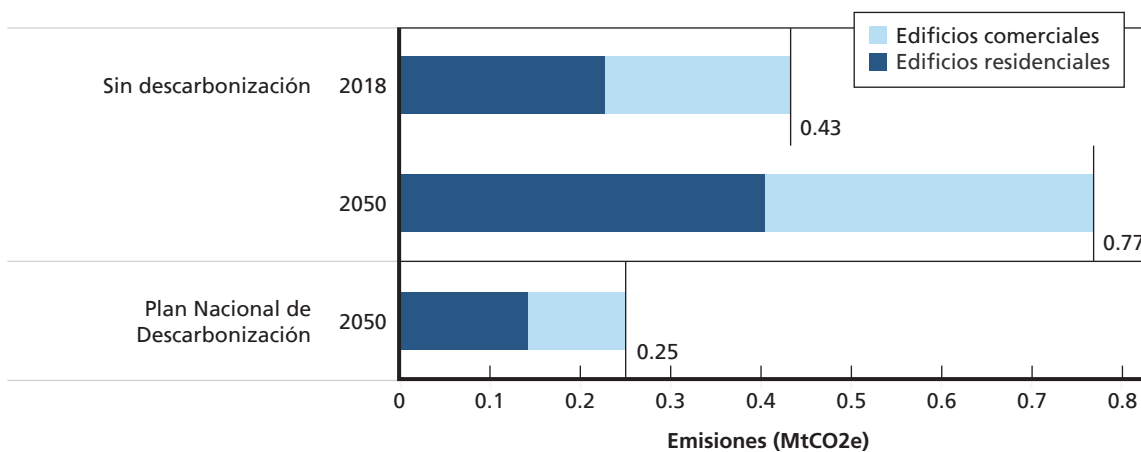
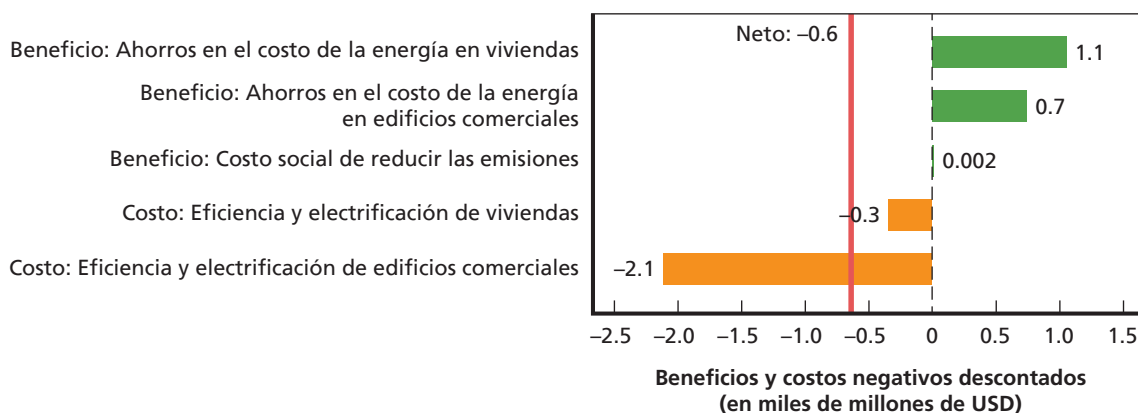
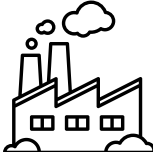


Gráfico 3.11
Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de edificios, según los supuestos de referencia





Sector industrial

Según los supuestos de referencia y la implementación del PNdD, las emisiones del sector industrial tendrían una reducción modesta: alrededor de un 21 por ciento, pero sería menos de la mitad de las emisiones sin el PNdD. El costo sería de \$2.200 millones, con alrededor de \$4.300 millones en beneficios por los menores costos de energía y una mayor productividad.

Hay tres formas en que las emisiones se reducirían en el sector industrial: (1) las reducciones de las emisiones asociadas con la producción de cemento (la principal fuente industrial de emisiones de GEI), (2) la reducción de las emisiones asociadas con el uso de productos industriales, como los refrigerantes y (3) las reducciones de las emisiones relacionadas con la energía necesaria para los procesos industriales (gráfico 3.12).

Los principales beneficios para Costa Rica de la descarbonización del sector industrial podrían estar dados por la mayor productividad industrial asociada con las medidas de descarbonización. Con un enfoque conservador, estimamos que la productividad podría mejorar a una tasa equivalente a un tercio de la descarbonización (p. ej., un 10 por ciento de descarbonización mejoraría la productividad en un 3,3 por ciento). Según este supuesto, el sector industrial podría obtener beneficios por \$3.600 millones (gráfico 3.13). Los costos del sector industrial se deben principalmente a reducir las emisiones generadas por la producción de cemento (unos \$1.400 millones), reducir las emisiones de los productos industriales (unos \$600 millones) y hacer un uso más eficiente de la energía (unos \$200 millones), según los supuestos de referencia. Los beneficios netos con estos supuestos de referencia equivalen a \$2 mil millones.

Gráfico 3.12
Emisiones del sector industrial sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización

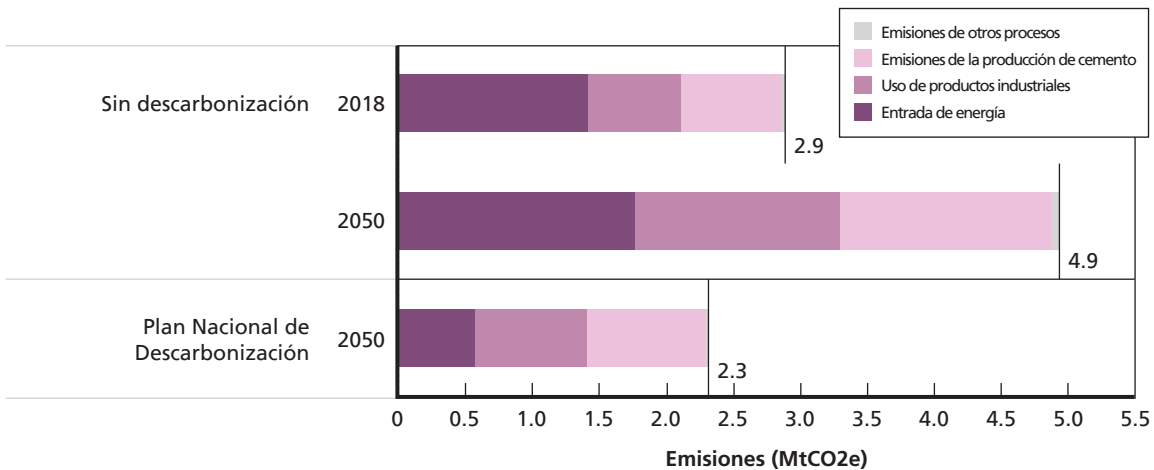
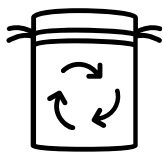
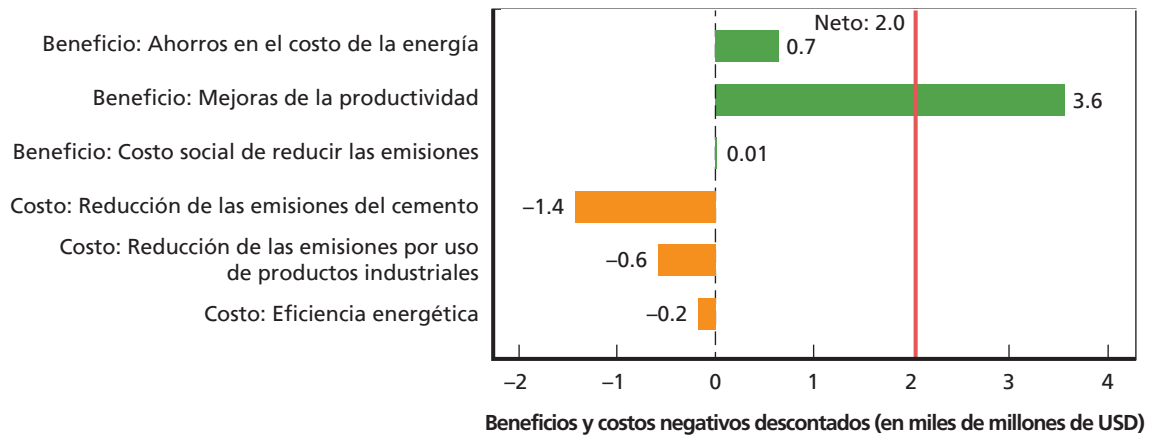


Gráfico 3.13
Beneficios y costos de la descarbonización para el sector industrial, según los supuestos de referencia



Sector de residuos

Según los supuestos de referencia y la implementación del PNdD, las emisiones del sector de residuos se reducirían en un 57 por ciento, a un costo de unos \$4.400 millones. La descarbonización generaría unos \$3.700 millones de valor gracias al reciclaje de materiales, el tratamiento de las aguas residuales y beneficios estéticos por la recolección y tratamiento de la mayor parte de los residuos sólidos y líquidos.

La descarbonización del sector de residuos permite reducir las emisiones de GEI de diferentes fuentes. Actualmente, se trata solo el 14,4 por ciento de las aguas residuales, lo que ocasiona importantes emisiones de GEI a medida que el material orgánico se descompone. La recolección y el tratamiento de estos residuos de los sectores industrial y comercial permitirían reducir significativamente las emisiones de GEI (gráfico 3.14). De manera similar, el desecho de basura y el uso de vertederos para los residuos que podrían reciclarse o compostarse llevaría a casi 3,3 MtCO₂e de emisiones para el año 2050, según los supuestos de referencia. Implementar las acciones de recolección, reciclaje, captura de metano y compostaje incluidas en el PNdD podría reducir estas emisiones en alrededor del 70 por ciento. Las emisiones negativas asociadas con el reciclaje que se muestran en el gráfico 3.14 reflejan la sustitución de los materiales vírgenes y la eliminación de las emisiones necesarias para producirlos.

Descarbonizar el sector de residuos genera muchos beneficios. En consonancia con el concepto de “economía circular”, el valor de los residuos reciclados y de las aguas residuales tratadas podría compensar gran parte de los costos asociados con la descarbonización (gráfico 3.15). Existen también importantes beneficios ambientales de recolectar y tratar las aguas residuales. Las evaluaciones sobre la voluntad de pago revelan que los hogares sin conexiones a sistemas de alcantarillado centralizados valoran la mayor higiene y conveniencia de tener esas conexiones en un importe equivalente a más de \$20 por mes, por vivienda, lo que se traduce en alrededor de \$440 millones de manera agregada (Dixon, 2012). Evaluaciones similares revelan otros \$200 millones por beneficios relativos a las aguas subterráneas y el medioambiente de la región gracias a una menor cantidad de aguas residuales sin tratamiento en las comunidades. Puede haber otros beneficios ecosistémicos generados por la mayor recolección y el tratamiento de los residuos sólidos y líquidos que no se reflejan en nuestros cálculos debido a la falta de datos.

Gráfico 3.14
Emisiones del sector de residuos sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización, según los supuestos de referencia

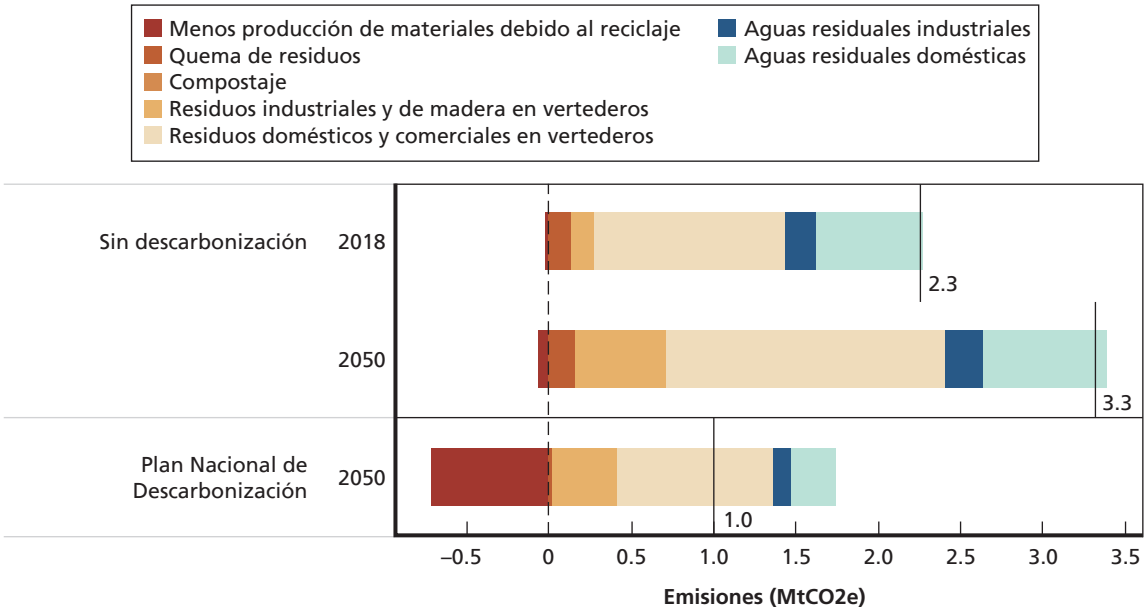
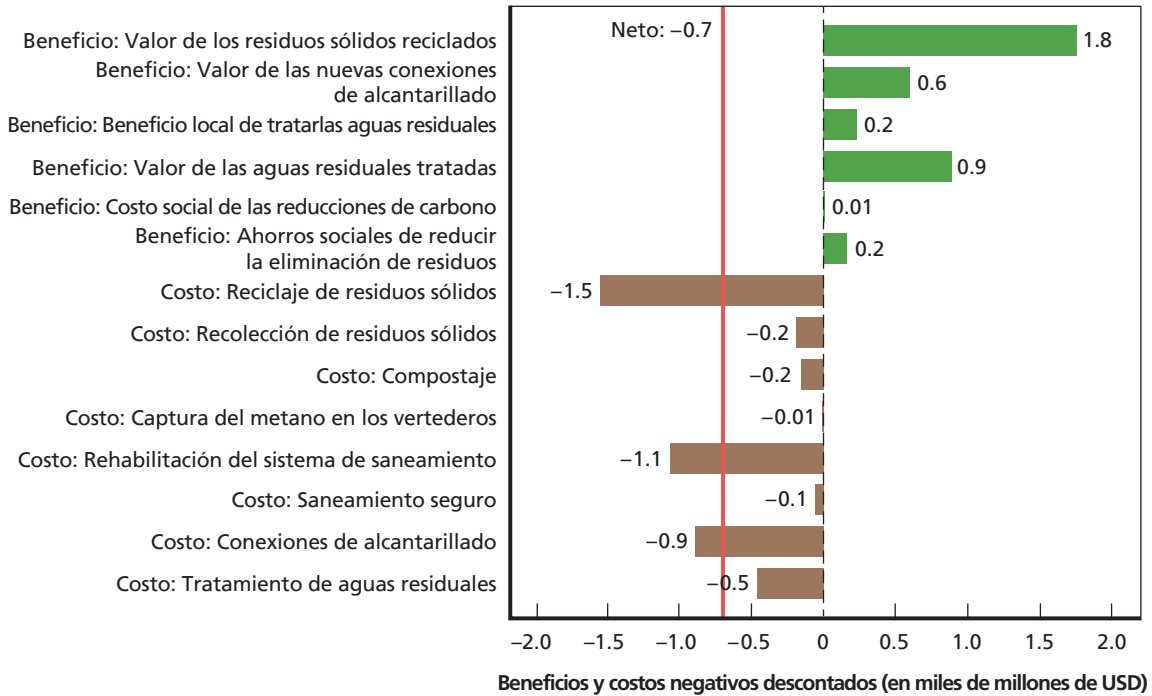


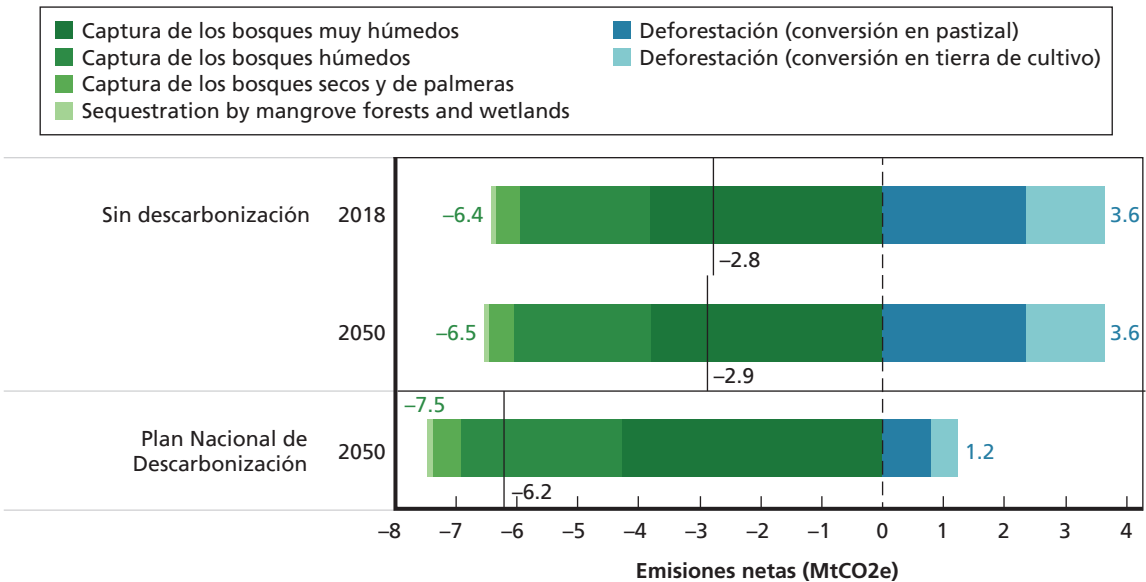
Gráfico 3.15
Beneficios y costos de la descarbonización para el sector de residuos, según los supuestos de referencia



Es difícil estimar los costos de reciclar los residuos en el nivel general de este estudio. Suponemos, a modo de referencia, que la suma de los costos de recolectar y reciclar los materiales equivale al valor

Gráfico 3.17

Emisiones del sector de soluciones basadas en la naturaleza sin descarbonización y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización



mayor potencial de reducir las emisiones está dado por las estrategias de gestión orientadas al sector de ganado de porte grande. Mejorar el manejo del estiércol, el abono y plantar más árboles son actividades que podrían ocasionar una reducción de 2 MtCO₂e en comparación con el escenario “sin descarbonización”. Las mejoras en los procesos agrícolas y la electrificación de los equipos podrían permitir una reducción adicional de unas 0,5 MtCO₂e para el año 2050, según los supuestos de referencia.

El sector de soluciones basadas en la naturaleza presenta una oportunidad fabulosa para aumentar la captura de carbono y compensar las emisiones de otros sectores que podrían ser difíciles de eliminar. El PNdD podría reducir las emisiones mediante dos estrategias principales: (1) conservar los bosques, lo que podría eliminar la liberación de CO₂ a la atmósfera si los bosques se talaran y (2) mejorar la gestión del bosque para que capture más carbono. Considerando nuestros supuestos de referencia, Costa Rica detiene gradualmente todas las actividades de deforestación del bosque primario y reduce las emisiones netas en alrededor de 2,4 MtCO₂e (gráfico 3.17). Luego, la tasa de captura de las tierras boscosas existentes aumenta como resultado de una mejor gestión y se reducen las emisiones netas en alrededor de 1 MtCO₂e.

Las medidas de descarbonización en los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza generarían importantes beneficios netos (gráfico 3.18). Las tres categorías principales son (1) un mayor rendimiento agrícola debido a una mejor gestión (\$4 mil millones);³ (2) beneficios por el incremento de los servicios ecosistémicos al no talar los bosques húmedos, secos o de manglares (\$7.200 millones) y (3) una mejor gestión de las zonas boscosas (\$13.500 millones).⁴ Según nuestras estimaciones, los costos serían mucho más bajos que los beneficios. Los supuestos de referencia indican alrededor de \$400 millones de costos para implementar las mejoras agrícolas y \$650 millones para

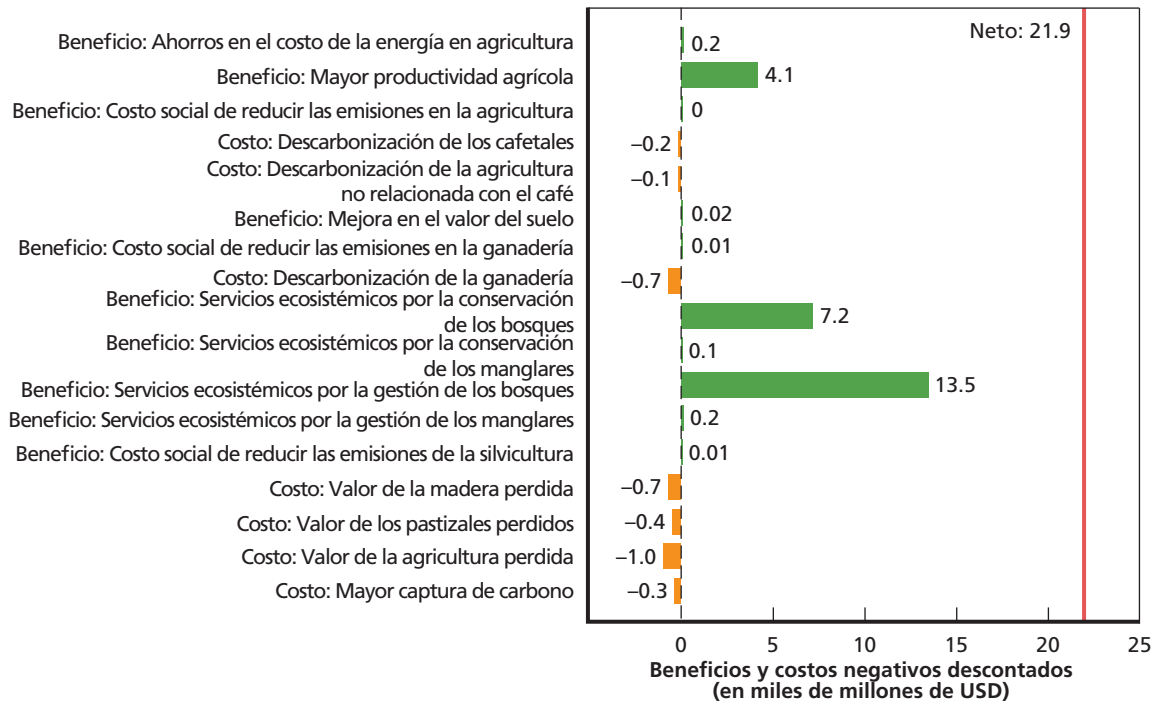
³ Consultar Karlsson, Alfredsson, y Westling (2020) y Verspecht et al. (2012) para ver una reseña de los estudios que describen los beneficios agrícolas de la mitigación climática.

⁴ El Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF (2017) brinda estimaciones del valor del ecosistema asociado con los bosques, las cuales utilizamos para calcular los beneficios de conservar los bosques y mejorar su gestión.

mejorar las prácticas ganaderas, basados en factores de costo para las reducciones por unidad de las emisiones de GEI en los sectores de agricultura y ganadería (Gillingham y Stock, 2018). Para establecer un límite superior para los costos de reducir la deforestación, consideramos los costos de oportunidad por no talar los bosques. Específicamente, estimamos el valor de la madera perdida por no quitar los bosques primarios (\$700 millones), el valor perdido en relación con el pastoreo del ganado (\$400 millones) y el valor perdido en actividades agrícolas (mil millones de dólares). Tomando como base el costo por unidad de reducir las emisiones de GEI de los bosques tropicales, compilado por Busch et al. (2019), calculamos que el costo de aumentar la captura de carbono por parte de los bosques será de unos \$300 millones en los próximos 30 años, tal como se muestra en el gráfico 3.18.

Los resultados que se presentan en este capítulo se basan todos en un conjunto de supuestos de referencia. Existen marcadas incertidumbres en torno a estos supuestos, por lo cual es importante entender si y de qué manera estas podrían impedir que se logre la reducción de las emisiones planteadas en el PNdD y los beneficios netos de implementar este plan. El Capítulo 4 presenta el análisis de la incertidumbre.

Gráfico 3.18
Beneficios y costos de la descarbonización para los sectores de agricultura, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza, según los supuestos de referencia



¿Qué grado de incertidumbre hay respecto al éxito que pueda tener el Plan de Descarbonización de Costa Rica?

Las estimaciones de las futuras emisiones de GEI y los beneficios netos de implementar el PNdD de Costa Rica que se presentan en el Capítulo 3 se basan en un solo supuesto de referencia para cada uno de los 348 factores de incertidumbre. En este capítulo, exploramos en qué medida otros supuestos posibles sobre el futuro pueden afectar estas estimaciones. El rango de resultados que se presentan aquí no sugieren las probabilidades que tienen los distintos resultados de existir, sino que:

1. establece que implementar el PNdD generaría cero emisiones netas en la mayoría de los futuros plausibles y, al hacerlo, también permitiría que se obtengan beneficios netos para otros aspectos de Costa Rica y
2. proporciona información sobre los supuestos que deben cumplirse para que el PNdD logre sus objetivos de descarbonización con un gran beneficio neto para Costa Rica.

Esta información nos ayuda a determinar si sería útil proponer objetivos alternativos o de qué manera desarrollar objetivos flexibles que se ajusten a lo largo del tiempo en respuesta a los impulsores externos. El Capítulo 5 explica este enfoque.

La primera sección de este capítulo describe qué rendimiento tendrá el PNdD en los 3.003 futuros plausibles descritos en el Capítulo 2, centrándose en mostrar la variabilidad potencial del PNdD respecto de las emisiones y los beneficios netos. La segunda parte del capítulo analiza sistemáticamente estos resultados para identificar los principales impulsores de las vulnerabilidades y los umbrales asociados.

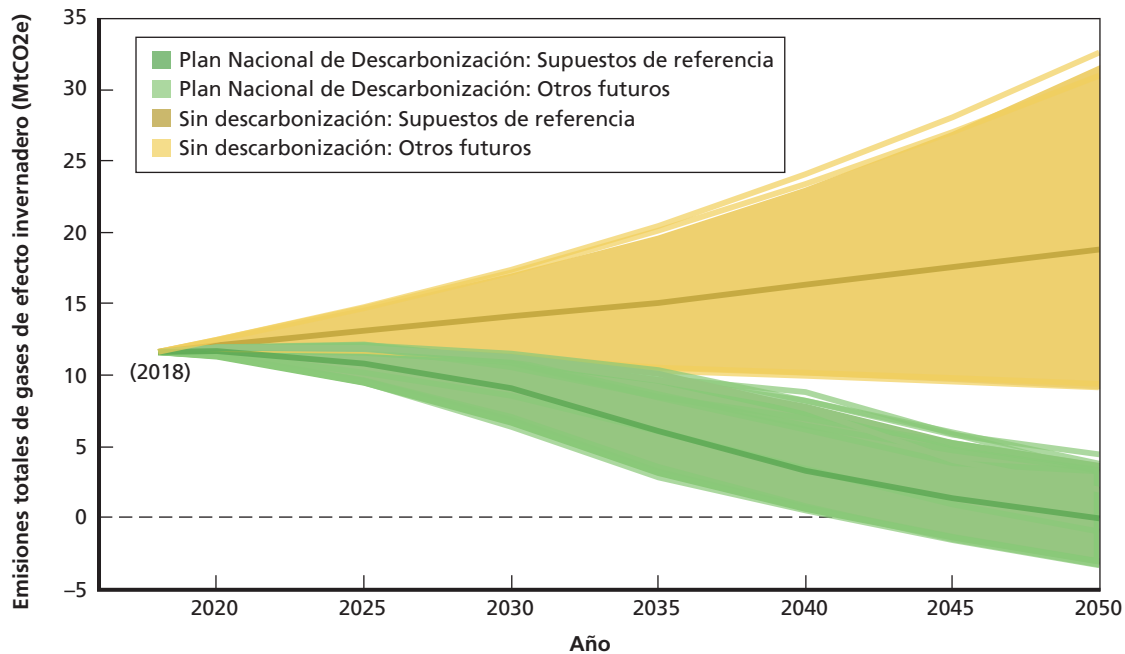
Rango de emisiones y beneficios netos en diferentes futuros inciertos

Sin la implementación del PNdD, las emisiones serían superiores a los niveles actuales (alrededor de 12 MtCO_{2e}) e incluso los duplicarían y más (gráfico 4.1). Si consideramos ciertos supuestos, las emisiones podrían mantenerse estables o incluso reducirse ligeramente hasta alrededor de 9 MtCO_{2e} en el año 2050. Pero solo sería posible conseguir cero emisiones netas con acciones significativas de descarbonización.

La implementación del PNdD podría ocasionar una reducción de las emisiones de, al menos, 61 por ciento en todos los futuros, llegar a un valor inferior a 1 MtCO_{2e} en el 77 por ciento de los futuros y generar emisiones netas negativas en el 47 por ciento de los futuros evaluados. La incertidumbre en torno de las emisiones con la implementación del PNdD es más baja que en los casos sin descarboniza-

Gráfico 4.1

Proyecciones sobre las emisiones GEI, sin descarbonización (amarillo) y con la implementación del Plan Nacional de Descarbonización (verde), en 3.003 futuros plausibles



ción, ya que las acciones del PNdD reducen el grado de sensibilidad de las emisiones a los impulsores socioeconómicos.

La implementación del PNdD generaría importantes beneficios netos para Costa Rica en la amplia gama de condiciones plausibles evaluadas. El gráfico 4.2 muestra los costos descontados a lo largo del eje horizontal y los beneficios netos descontados a lo largo del eje vertical para cada uno de los 3.003 futuros plausibles.¹ La gran mayoría de los casos (el 99 por ciento) presenta beneficios netos positivos (indicados por el color verde) y algunas proyecciones (1 por ciento) sugieren beneficios netos superiores a los \$100 mil millones. En unos pocos casos (21 casos, menos del 1 por ciento), los costos superan los beneficios, tal como lo indica el color rojo en el gráfico 4.2. A continuación, exploramos qué podría impulsar los beneficios negativos.

¿Qué factores podrían hacer que el Plan de Descarbonización no consiga sus objetivos?

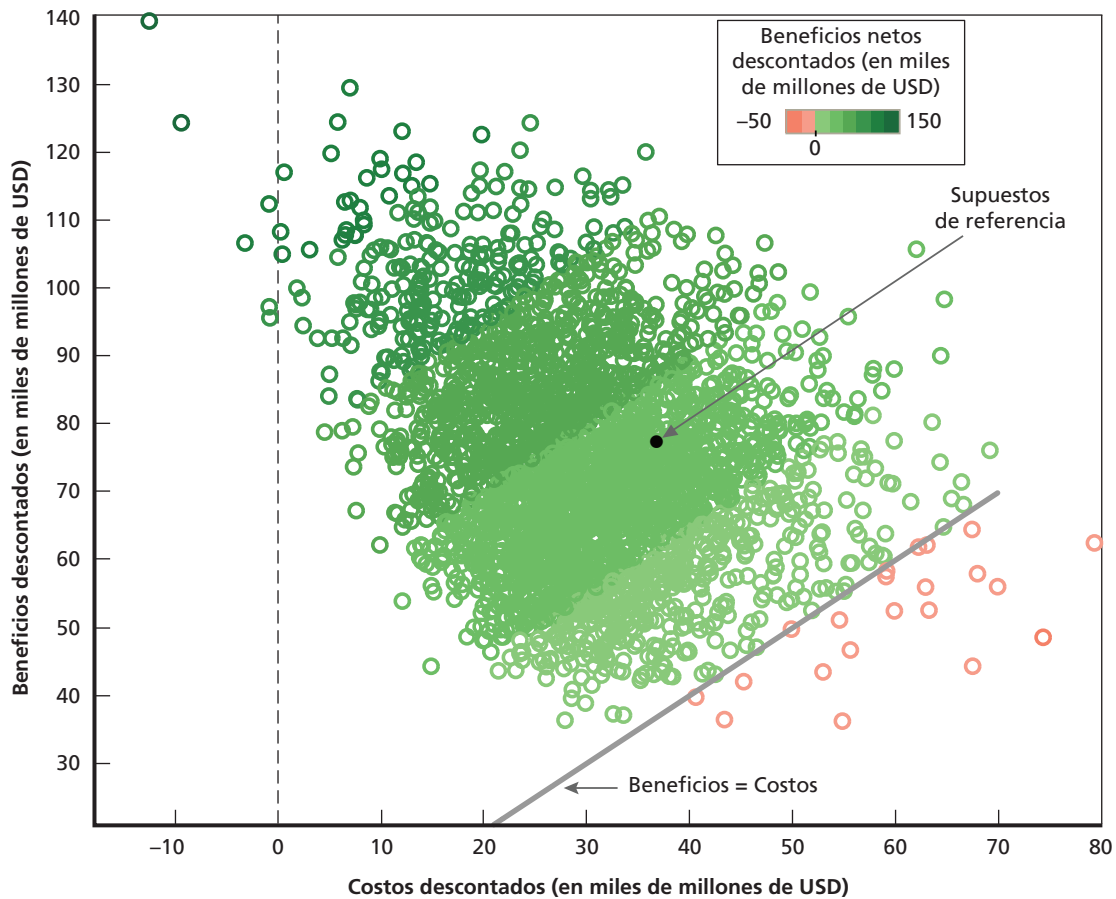
Para entender el significado de los rangos calculados de emisiones y beneficios netos para las iniciativas de descarbonización en Costa Rica, identificamos los supuestos que conducen a altas emisiones o a beneficios netos bajos. Para eso, inspeccionamos los resultados y los procesamos con herramientas estadísticas más sofisticadas.

Definición de los umbrales de rendimiento

Como orientación para este análisis, definimos los resultados que representan la implementación infructuosa del PNdD. Consideramos, en particular, dos condiciones:

¹ Descontamos los costos y los beneficios utilizando una tasa de descuento del 5 por ciento. Los costos negativos reflejan los futuros en los cuales las inversiones de capital, que suelen ser más altas para el PNdD, son en realidad más bajas en el PNdD.

Gráfico 4.2
Costos y beneficios de implementar el Plan Nacional de Descarbonización en 3.003 futuros plausibles



- **Emisiones de GEI altas:** Se trata de casos en los que el PNdD reducirá la emisiones de 2050 en menos de un 90 por ciento en comparación con los niveles de 2018, dado que los objetivos de emisiones futuras suelen establecerse en función de las emisiones actuales. Al evaluar todos los sectores, este umbral equivale a 1,16 MtCO₂e (10 por ciento del total de 11,62 MtCO₂e). Si evaluamos el sector de transporte, el umbral es de 0,57 MtCO₂e (10 por ciento del total de 5,7 MtCO₂e). Si evaluamos otros sectores diferentes del de transporte, consideramos un umbral que identifica el primer cuartil, ya que no todos los sectores necesitan reducir el 90 por ciento de las emisiones actuales para alcanzar el objetivo general. En cada caso, utilizamos las técnicas de RDM para caracterizar las condiciones inciertas que podrían ocasionar altas emisiones de GEI.
- **Beneficios netos bajos:** Consideramos dos umbrales diferentes, ya que cada uno puede proporcionar datos importantes. Primero, establecimos el umbral en cero beneficios netos y describimos qué factores impulsan la menor cantidad de casos en los que las emisiones netas son negativas. Para considerar un conjunto más amplio de casos plausibles en los cuales los beneficios netos se clasifican como bajos, establecimos un umbral más alto: el nivel de emisiones netas que delimita el primer cuartil de los casos. Si observamos todos los sectores, este umbral es de \$29.700 millones; para el sector de transporte por separado, este umbral es de \$15.500 millones y, para los sectores que no son el de transporte, este nivel es de \$11.600 millones. Al igual que con las emi-

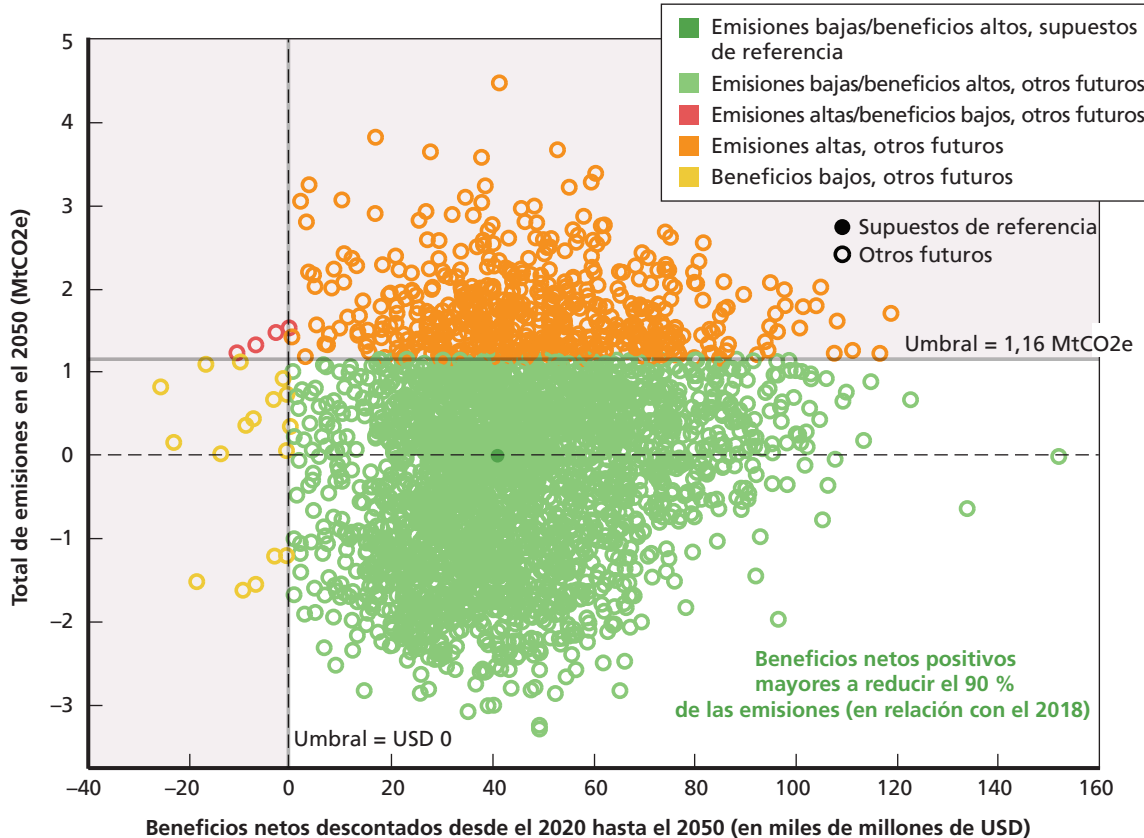
siones, utilizamos técnicas de RDM para caracterizar el futuro en condiciones de incertidumbre que podrían ocasionar beneficios netos bajos.

El gráfico 4.3 compara el total de las emisiones en el año 2050 con los beneficios netos descontados para cada uno de los 3.003 futuros e indica qué resultados no permitirían conseguir los objetivos del PNDD. Los símbolos de color rojo y naranja son casos de emisiones de GEI altas (18 por ciento de los casos). Los símbolos de color amarillo y rojo representan casos de beneficios netos bajos (menos del 1 por ciento de los casos). Los símbolos de color verde son los casos que están tanto por debajo del umbral de emisiones como por encima del umbral de beneficios netos (81 por ciento de los casos). La estimación presentada en el Capítulo 3 está indicada por el círculo verde oscuro.

Identificación de los principales impulsores y vulnerabilidades

Cada proyección futura de emisiones de GEI y beneficios netos se basa en más de 300 factores de modelos inciertos diferentes (ver el cuadro 2.13). Las técnicas de descubrimiento de escenarios (Bryant y Lempert, 2010) ayudan a identificar en qué futuros se produciría un resultado de interés (en este caso emisiones de GEI altas o beneficios netos bajos). Las técnicas permiten identificar las vulnerabilidades como rangos de un conjunto pequeño de parámetros inciertos que generan resultados de interés. Podrían definirse

Gráfico 4.3
Beneficios netos descontados y emisiones de GEI en 2050 para los 3.003 futuros, clasificados según riesgo del resultado



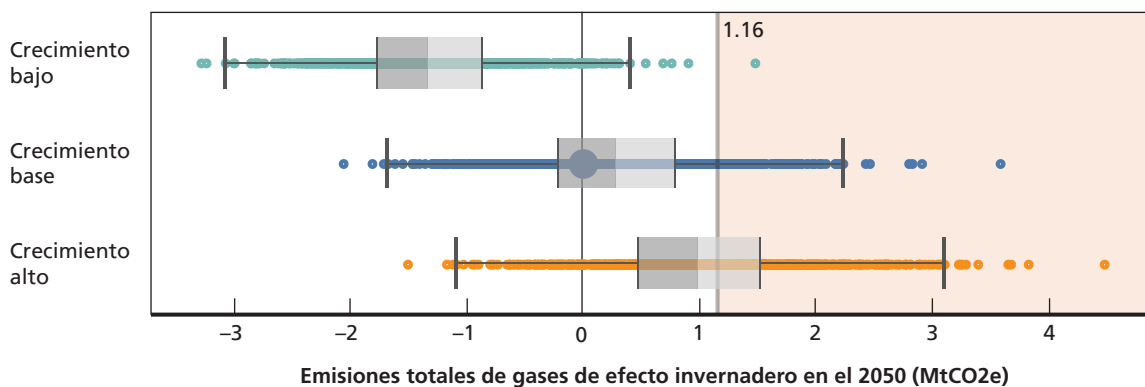
muchas vulnerabilidades diferentes. Algunas describen muchos futuros plausibles de interés (alta cobertura), pero también definen condiciones que podrían llevar a resultados exitosos (baja densidad). Otras vulnerabilidades podrían estar más orientadas a los resultados de interés (alta densidad), pero solo explicar un número reducido de los casos de interés (baja cobertura). Para fines de este análisis, utilizamos varias técnicas específicas para analizar el conjunto amplio de incertidumbres e identificar las más importantes. Hay muchas razones aparentemente obvias que explican por qué el PNdD podría no lograr las reducciones de emisiones deseadas o hacerlo con beneficios netos bajos. No obstante, este análisis técnico nos dice cuáles de esas razones son, en realidad, las que generan resultados insatisfactorios.

Primero, nos enfocamos en los resultados con emisiones de GEI altas y, luego, observamos los resultados con beneficios netos bajos. Dado que hay diferencias considerables en la forma en que se modela cada sector, primero determinamos qué sectores son los principales impulsores de la incertidumbre y, luego, definimos las vulnerabilidades dentro de esos sectores.

Impulsores de las emisiones de GEI altas

Sin una acción coordinada para descarbonizar, el mayor crecimiento económico origina emisiones más altas. Este análisis nos dice qué aspectos del PNdD deberían ser particularmente efectivos para asegurar una disociación suficiente entre el crecimiento de las actividades económicas y las emisiones de GEI con beneficios netos para la economía. Con los supuestos de bajo crecimiento, las emisiones de GEI totales en 2050 son casi siempre inferiores al umbral definido de 1,16 MtCO₂e (gráfico 4.4). No obstante, con los supuestos de crecimiento base y crecimiento alto, hay muchos casos en los que las emisiones superan el umbral. Si consideramos un crecimiento alto, alrededor del 41 por ciento de los casos superan el umbral y, si consideramos el crecimiento base, alrededor del 13 por ciento de los casos supera el umbral. Estos hallazgos no sugieren que el crecimiento económico no sea compatible con la descarbonización. De hecho, más de la mitad de los escenarios de alto crecimiento conducen a emisiones que están por debajo de nuestro umbral. Los hallazgos solo sugieren que un mayor crecimiento económico tiene el potencial de generar emisiones más altas. Cuanto más rápido crezca la economía, mayor importancia tendrá descarbonizar las actividades económicas para llegar a tener cero emisiones netas en el año 2050.

Gráfico 4.4
Emisiones de GEI totales en 2050, según cada escenario de crecimiento económico



NOTAS: El sombreado de color naranja indica resultados que superan el umbral de emisiones. Los resultados basados en los supuestos de referencia están indicados por el círculo grande. Las cajas horizontales indican la mediana y el rango intercuartílico [RIC] (resultados del primer y tercer cuartil) y los “bigotes” de las cajas se extienden hasta los valores máximo y mínimo de la serie (1,5 veces el RIC). Los escenarios de crecimiento económico bajo, base y alto corresponden a un crecimiento promedio a largo plazo de 2 por ciento, 3,5 por ciento y 4 por ciento al año.

Cuadro 4.1
Medianas de emisiones de GEI en el 2050, por sector, para los casos de emisiones de GEI totales bajas y los casos de emisiones de GEI totales altas

Sector	Mediana de emisiones por sector para los casos de emisiones de GEI totales bajas (% de las emisiones de GEI totales altas)	Mediana de emisiones por sector para los casos de emisiones de GEI totales altas
Transporte	0.47 (65%)	0.72
Electricidad	0.05 (100%)	0.05
Edificios	0.23 (82%)	0.28
Industria	2.07 (73%)	2.83
Residuos	0.97 (86%)	1.13
Agricultura	0.82 (94%)	0.87
Ganadería	1.31 (76%)	1.72
Soluciones basadas en la naturaleza	-6.31 (+7% de reducción)*	-5.9

NOTAS: * Indica aquellas emisiones que son más negativas que las correspondientes al caso de emisiones de GEI totales altas y, por lo tanto, informamos la reducción adicional respecto del resultado de la mediana. Los sectores sombreados son aquellos cuyas emisiones medianas por sector son significativamente más altas en los futuros que conducen a emisiones de GEI totales altas.

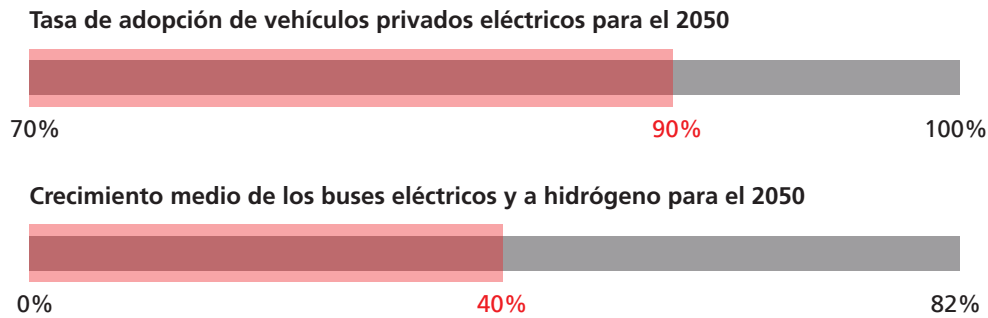
El análisis identifica qué sectores impulsan la variación en el total de emisiones de GEI. El cuadro 4.1 muestra que las emisiones de los sectores de transporte, industria, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza tienden a ser bajas cuando el total de emisiones es bajo y tienden a ser altas cuando el total de emisiones es alto. Por eso, las incertidumbres en las emisiones de estos sectores son de fundamental importancia para determinar el total de emisiones y el éxito del PNdD, dado que estos sectores son primordiales tanto en el volumen de las emisiones como en su reducción. A continuación, nos centramos en el análisis de la vulnerabilidad de estos sectores. Dada la similitud en las emisiones entre los casos de emisiones bajas y altas para los demás sectores, los análisis adicionales sobre la vulnerabilidad no proporcionan ninguna conclusión reveladora.

Emisiones del sector de transporte

En esta sección, identificamos qué supuestos son los más críticos para que se reduzcan las emisiones en el sector de transporte. Definimos los casos de emisiones de transporte altas como aquellos en los que las emisiones superan por más de un 10 por ciento los niveles de 2018 (0,57 MtCO₂e) y, luego, usamos el descubrimiento de escenarios para definir las vulnerabilidades. Primero, identificamos un conjunto de las incertidumbres más influyentes a partir del conjunto inicial de incertidumbres, mediante el algoritmo C5.0 (Quinlan, 1993; Hornik et al., 2007). Este proceso identifica 39 de las 135 incertidumbres relacionadas con las emisiones de transporte. Luego, usamos el algoritmo del Método de inducción llamado “Patient Rule Induction” (PRIM; Lempert et al., 2006; Bryant y Lempert, 2010) para identificar cuáles de las 39 incertidumbres son más críticas y qué combinaciones de supuestos generan vulnerabilidades. Mediante este enfoque, el PRIM identifica tres vulnerabilidades que, en conjunto, describen el 76 por ciento de los casos de emisiones de GEI altas en el sector de transporte.

Vulnerabilidad 1: “Baja adopción de vehículos de combustibles alternativos”: Esta vulnerabilidad describe futuros en los que la adopción de vehículos eléctricos y de hidrógeno es baja, lo cual genera emisiones de GEI altas en el sector de transporte. Las medidas de descarbonización del PNdD para este

Gráfico 4.5
Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Baja adopción de vehículos de combustibles alternativos”



sector facilitarían el cambio de los vehículos convencionales a diferentes tipos de vehículos que funcionan con combustibles alternativos. Sin embargo, el análisis identifica que, para reducir las emisiones de GEI del transporte, es fundamental que se difundan dos tecnologías en particular (gráfico 4.5):

- **Baja adopción de vehículos privados eléctricos:** En esta vulnerabilidad, la proporción de vehículos privados eléctricos (incluidos los taxis) es inferior al 90 por ciento para el año 2050. En nuestro análisis, el rango de variación de este impulsor es de entre 70 y 100 por ciento.
- **Baja conversión de los autobuses a electricidad e hidrógeno:** En esta vulnerabilidad, el crecimiento promedio de vehículos eléctricos y de hidrógeno en el transporte público es inferior al 40 por ciento para el año 2050. En nuestro análisis, el rango de variación de este impulsor es de entre 0 y 82 por ciento.

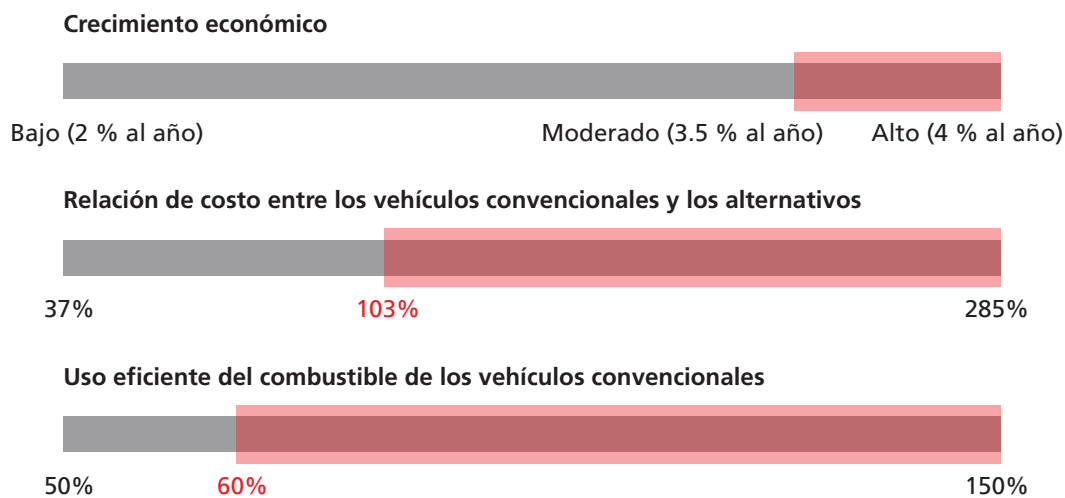
Más del 70 por ciento de los futuros que tienen una baja adopción de vehículos eléctricos y autobuses de hidrógeno también tienen emisiones de transporte altas (superiores al umbral de 0,57 MtCO₂e) y el 40 por ciento de los casos de emisiones de GEI altas en el sector de transporte tienen una escasa adopción de vehículos eléctricos y autobuses de hidrógeno. Por lo tanto, esta combinación particular de condiciones futuras representa un riesgo clave para lograr el objetivo de emisiones que plantea el PNdD.

Otras dos vulnerabilidades describen gran parte del riesgo restante.

Vulnerabilidad 2: “Vehículos convencionales económicos y eficientes en un escenario de gran crecimiento económico”: Esta vulnerabilidad describe futuros en los que el crecimiento del PIB es fuerte (4 por ciento anual en promedio), pero resulta difícil separar las emisiones del crecimiento económico porque los vehículos convencionales siguen siendo más económicos que los nuevos vehículos eléctricos e híbridos y el consumo de combustible de los vehículos convencionales es mejor al esperado. La disponibilidad de vehículos convencionales económicos y relativamente eficientes retrasa la adopción de los vehículos eléctricos e híbridos, lo que incrementa las emisiones de GEI del sector de transporte. Más del 70 por ciento de los futuros con estas características son vulnerables. Estos futuros describen otro 20 por ciento de los casos de emisiones de GEI altas en el sector de transporte. Específicamente, la vulnerabilidad que se presenta a continuación se define por las condiciones siguientes (gráfico 4.6):

- **Alto crecimiento económico:** En esta vulnerabilidad, el crecimiento económico es alto: 4 por ciento anual.

Gráfico 4.6
Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Vehículos convencionales económicos y eficientes en un escenario de gran crecimiento económico”



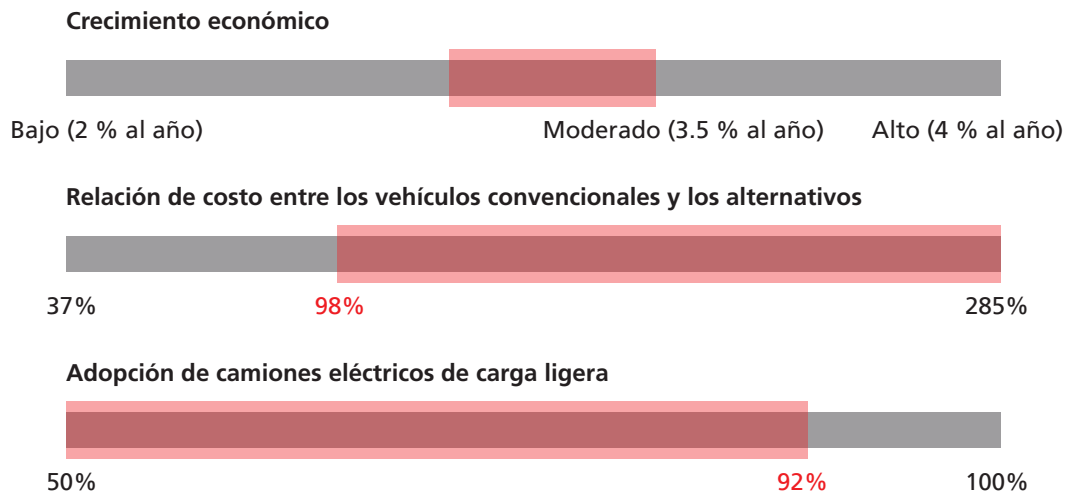
- **Vehículos alternativos relativamente costosos:** El costo de los vehículos eléctricos e híbridos en relación con los vehículos convencionales es alto en esta vulnerabilidad (es decir, la relación entre el costo de los vehículos eléctricos e híbridos y el de los vehículos convencionales supera el 103 por ciento en 2050). La relación actual (año 2018) contemplada en el modelo es de alrededor del 180 por ciento, donde los vehículos de combustibles alternativos cuestan, en promedio, \$39 mil en el caso de los autobuses, \$47.000 en el de los SUV, \$25.000 en el de los sedanes y \$38.000 en el de las minivanas.
- **Uso eficiente del combustible relativamente alto en los vehículos convencionales:** En esta vulnerabilidad, el uso eficiente del combustible en los vehículos convencionales aumenta más de lo esperado (60 por ciento más de eficiencia para el año 2050 con respecto a las condiciones actuales: 3,5 PJ por giga vehículo-kilómetros).

Vulnerabilidad 3: “Baja electrificación del transporte privado y de carga con crecimiento económico moderado”: Esta vulnerabilidad se centra en los casos de emisiones altas cuando el crecimiento económico es moderado: alrededor de un 3,5 por ciento al año. En estas condiciones, las emisiones son altas cuando los costos relativos de los vehículos de combustibles alternativos son altos, tal como sucede en la vulnerabilidad 2, y la adopción de los camiones eléctricos es baja. El 61 por ciento de los futuros con estas condiciones son vulnerables y estas condiciones describen otro 17 por ciento de los casos de emisiones de GEI altas en el sector de transporte. Específicamente, la vulnerabilidad que se presenta a continuación se define por las condiciones siguientes (gráfico 4.7):²

- **Crecimiento económico moderado:** En esta vulnerabilidad, el crecimiento económico es moderado: 3,5 por ciento anual.
- **Vehículos alternativos relativamente costosos:** El costo de los vehículos eléctricos e híbridos en relación con los vehículos convencionales es alto en esta vulnerabilidad (es decir, la relación entre

² Esta vulnerabilidad excluye el escenario de alto crecimiento económico, dado que la mayoría de los casos se incluyen en las vulnerabilidades 1 y 2.

Gráfico 4.7
Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Baja electrificación del transporte privado y de carga con crecimiento económico moderado”



el costo de los vehículos eléctricos e híbridos y el de los vehículos convencionales supera el 98 por ciento en 2050). La relación actual (año 2018) contemplada en el modelo es de alrededor del 180 por ciento, donde los vehículos de combustibles alternativos cuestan, en promedio, \$39.000 en el caso de los autobuses, \$47.000 en el de los SUV, \$25.000 en el de los sedanes y \$38.000 en el de las minivanas.

- **Baja adopción de camiones eléctricos:** En esta vulnerabilidad, la adopción de vehículos eléctricos de carga ligera permanece por debajo del 92 por ciento para el año 2050. En nuestro análisis, el rango de variación de este impulsor es de entre 50 y 100 por ciento.

En conjunto, estas tres vulnerabilidades describen los principales riesgos para alcanzar la descarbonización necesaria en el sector de transporte. El cuadro 4.2 resume estas vulnerabilidades y el Apéndice C brinda más detalles sobre la metodología utilizada, así como estadísticas y definiciones específicas de las vulnerabilidades relativas a las emisiones del sector de transporte.

Vulnerabilidades de las emisiones en los sectores de industria, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza

Luego, usamos el algoritmo PRIM para identificar las incertidumbres importantes y definir las principales vulnerabilidades de las emisiones para los sectores de industria, ganadería y soluciones basadas en la naturaleza.

En el caso de la industria, la principal vulnerabilidad de las emisiones se relaciona con la capacidad de Costa Rica de separar la actividad industrial de las emisiones. Cuando la producción industrial es alta (en concordancia con el escenario de alto crecimiento económico y alta actividad industrial), es esencial que se logren mejores efectivas mediante la electrificación. De no ser así, las emisiones industriales son más altas de lo que correspondería para que Costa Rica, en su conjunto, alcance las cero emisiones netas. El cuadro 4.3 resume las principales incertidumbres y vulnerabilidades del sector industrial.

En el caso de la ganadería, las emisiones son altas cuando las estrategias para reducir las emisiones de las operaciones relativas al ganado no son tan efectivas como se esperaba, a menos que la cantidad de

Cuadro 4.2
Principales incertidumbres y definiciones de vulnerabilidades del sector de transporte

Incertidumbres relativas al transporte	Vulnerabilidad 1: "Baja adopción de vehículos de combustibles alternativos"	Vulnerabilidad 2: "Vehículos convencionales económicos y eficientes en un escenario de gran crecimiento económico"	Vulnerabilidad 3: "Baja electrificación del transporte privado y de carga con crecimiento económico moderado"
Demanda de transporte (vinculada al crecimiento económico)	No disponible	Alto crecimiento económico: Crecimiento del 4 % del PIB, en promedio.	Crecimiento económico moderado: Crecimiento del 3,5 % del PIB, en promedio.
Costos tecnológicos	No disponible	Vehículos eléctricos e híbridos relativamente costosos: la relación entre el costo de los vehículos eléctricos e híbridos y el de los vehículos convencionales supera el 100 %.	Vehículos eléctricos e híbridos relativamente costosos: la relación entre el costo de los vehículos eléctricos e híbridos y el de los vehículos convencionales supera el 98 %.
Eficiencias de los vehículos	No disponible	Uso eficiente del combustible relativamente alto en los vehículos convencionales: las mejoras promedio en el uso eficiente del combustible diésel, gasolina y GLP es superior al 60 %.	No disponible
Crecimiento del transporte eléctrico privado y de carga*	Bajo crecimiento en la adopción de vehículos privados eléctricos: la proporción de transporte privado eléctrico para el año 2050 es inferior al 90 %.	No disponible	Baja adopción de camiones eléctricos: la proporción de transporte eléctrico de carga ligera es inferior al 92 %.
Crecimiento del transporte de carga pesada de hidrógeno*	Bajo crecimiento en la adopción de una flota de autobuses de hidrógeno: la proporción de vehículos de hidrógeno en el transporte público para el año 2050 es inferior al 29 %.	No disponible	No disponible

NOTA: Las variables no contempladas en las vulnerabilidades incluyen el costo de los combustibles, los costos de la infraestructura para la electrificación, los cambios de combustible y los cambios modales; las elasticidades de la demanda de los diferentes modos de transporte; el crecimiento del transporte público eléctrico y de hidrógeno, y el crecimiento de la proporción del uso de transporte público y el transporte no motorizado

* = incertidumbres respecto de la consecución de los objetivos del PNDD.

Cuadro 4.3
Incertidumbres y definición de las principales vulnerabilidades del sector industrial

Incertidumbres de la industria	Vulnerabilidad denominada "Separación insuficiente de las emisiones industriales"
Crecimiento económico	Alto crecimiento económico (crecimiento anual promedio de 4 % del PIB).
Valor industrial añadido	Alto valor agregado industrial (más de \$37.500 millones para el año 2050) [rango de incertidumbre = \$35 millones - \$54 millones].
Aumento de la electrificación de la actividad industrial	Menos del 70 por ciento de electrificación [rango de incertidumbre = 47 % - 73 %].

NOTAS: Esta vulnerabilidad describe el 75 por ciento de emisiones altas y el 69 por ciento de los casos descritos tienen altas emisiones. Las variables no contempladas en las vulnerabilidades incluyen aquellas relacionadas con las tasas de descarbonización del cemento y otros productos industriales, y las tasas de eficiencia energética. Para el año 2050, el umbral de emisiones de la industria se establece en 2,65 MtCO_{2e}.

animales crezca mucho menos que lo anticipado, tal como se señala en el escenario de bajo crecimiento económico. Específicamente, si las iniciativas para reducir las emisiones por fermentación entérica del ganado son menos efectivas, entonces, las emisiones serán altas independientemente de las acciones para descarbonizar otros tipos de ganado o, incluso, de la cantidad de cabezas de ganado que haya en el futuro. El cuadro 4.4 resume las principales incertidumbres y vulnerabilidades del sector ganadero.

Por último, en el sector de soluciones basadas en la naturaleza, habría bajas tasas de captura (es decir, menos emisiones negativas) en futuros en los que las tasas de captura de los bosques húmedos son menores que las esperadas o se reducen con el tiempo. Esto es porque las dos estrategias de descarbonización clave para la soluciones basadas en la naturaleza son las siguientes: (1) frenar la deforestación de los bosques primarios (incluidos los bosques húmedos, que tienen una alta tasa de captura y el potencial de ser deforestados) y (2) mejorar la gestión para de aumentar la tasa de captura actual. El cuadro 4.5 resume la principal incertidumbre y vulnerabilidad del sector de soluciones basadas en la naturaleza.

Impulsores de beneficios netos bajos

Realizamos un análisis de la vulnerabilidad similar para entender qué condiciones producirían beneficios netos bajos por la implementación del PNdD. Primero, examinamos los casos en que los beneficios

Cuadro 4.4
Incertidumbres y definición de las principales vulnerabilidades del sector ganadero

Incertidumbres de la ganadería	Vulnerabilidad denominada "Ganado de altas emisiones"
Crecimiento económico	Crecimiento económico de moderado a alto (crecimiento anual promedio de 3.5 % o más del PIB).
Reducción de las emisiones por fermentación entérica del ganado	Bajas reducciones por: <ul style="list-style-type: none"> ganado de doble propósito (superiores a 0,25 toneladas de CO₂e por animal [rango de incertidumbre = 0,04 - 0,80 toneladas de CO₂e por animal]); ganado de carne (superiores a 0,2 toneladas de CO₂e por animal [0,04 - 0,77]), y ganado lechero (superiores a 0,2 toneladas de CO₂e por animal [0,04 - 0,77]).

NOTAS: Las variables no contempladas en las vulnerabilidades incluyen aquellas relacionadas con las tasas de descarbonización de la fermentación entérica del ganado no vacuno, las tasas de descarbonización del estiércol y la cantidad de animales. Esta vulnerabilidad describe el 91 por ciento de los casos de emisiones altas y el 51 por ciento de los casos descritos tienen altas emisiones. Para el año 2050, el umbral de emisiones de la ganadería se establece en 1,65 MtCO₂e.

Cuadro 4.5
Incertidumbre y definición de la principal vulnerabilidad del sector de soluciones basadas en la naturaleza

Incertidumbre de la soluciones basadas en la naturaleza	Vulnerabilidad denominada "Bajas tasas de captura de los bosques húmedos"
Tasas de captura de los bosques húmedos	Una tasa de captura de carbono de los bosques primarios húmedos inferior a las 2,7 toneladas de CO ₂ por hectárea [rango de incertidumbre = 2,2 - 3,3 toneladas de CO ₂ por hectárea].

NOTAS: Las variables no contempladas en las vulnerabilidades incluyen aquellas relacionadas con las tasas de deforestación (factores separados entre los diferentes tipos de bosques, los pastizales y las tierras agrícolas), las emisiones por convertir los bosques en pastizales o tierras agrícolas, las tasas de captura de los bosques secos, húmedos, de palmeras y manglares (bosques primarios y secundarios) y las tasas de captura de los bosques húmedos secundarios. Esta vulnerabilidad describe el 91 por ciento de los casos de emisiones altas y el 53 por ciento de los casos descritos tienen altas emisiones. Para el año 2050, el umbral de emisiones de la soluciones basadas en la naturaleza se establece en -5,91 MtCO₂e.

netos totales del PNdD son negativos (los símbolos rojos en el gráfico 4.2). Hay solo unos pocos casos (21) y todos se asocian con casos en que el sector de transporte tiene beneficios netos bajos. Si examinamos los supuestos de transporte para estos 21 casos, vemos que los casos de beneficios netos negativos se dan cuando coexisten tres condiciones adversas. Así, esta vulnerabilidad describe un conjunto único de circunstancias adversas que pueden afectar el punto de equilibrio del PNdD desde el punto de vista económico:

- Costos altos de diferentes tecnologías clave en forma simultánea: los autobuses, transporte de carga y trenes eléctricos, junto con una alta penetración del transporte de carga eléctrico. Esto incrementa los costos de inversión y, por lo tanto, contribuye a que los beneficios netos del PNdD sean bajos.
- Bajas tasas de ocupación de los taxis y desarrollo lento de las líneas de autobuses eléctricos. Esto aumenta la cantidad de kilómetros recorridos y, por lo tanto, suben los costos por temas de salud, accidentes y congestión vehicular, así como los de operaciones y mantenimiento del transporte privado.
- Bajas tasas de mezcla de etanol y biodiesel. Las tasas más bajas representan emisiones más altas en los vehículos privados y de carga, lo que incrementa los costos relacionados con la salud.

Cabe mencionar que, si una de estas condiciones no se sostiene, estimamos que los beneficios serían positivos.

Luego, el análisis identifica sectores que podrían llevar a beneficios netos totales bajos del PNdD. Si examinamos la distribución de los beneficios netos por sector para casos de beneficios netos bajos del PNdD y casos de beneficios netos altos del PNdD, vemos que la variación en los beneficios netos de transporte es mucho mayor que la de todos los demás sectores (no se muestra). Por este motivo, debemos explorar de forma independiente la incertidumbre en torno a los beneficios netos de los sectores que no son el de transporte.

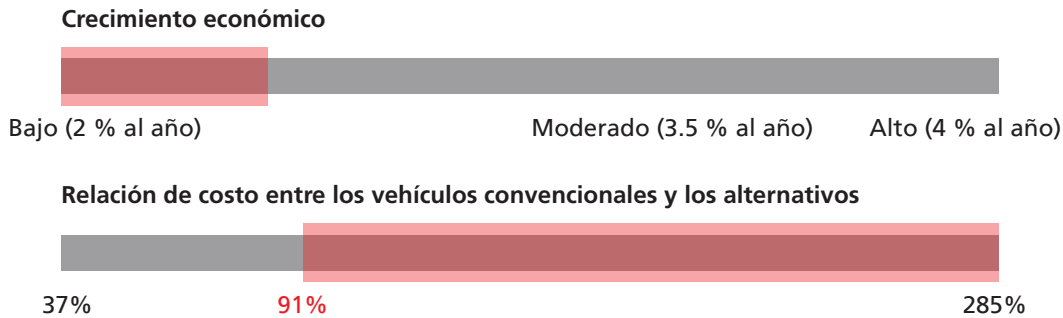
Beneficios netos bajos por la descarbonización del sector de transporte

Utilizamos el mismo enfoque presentado en la sección anterior para analizar las condiciones de vulnerabilidad asociadas con los beneficios netos del transporte. En este caso, el PRIM identifica dos vulnerabilidades que, en conjunto, describen el 68 por ciento de los casos de beneficios netos bajos en el sector de transporte.

Beneficios netos del sector de transporte - Vulnerabilidad 1: “Alto costo de los vehículos alternativos en condiciones de crecimiento económico bajo”: En esta vulnerabilidad, el crecimiento económico es bajo, lo que ocasiona menos emisiones sin descarbonización y, por lo tanto, una menor oportunidad para los beneficios correspondientes a la reducción de las emisiones. En conjunto con los altos costos de los vehículos alternativos, esto empuja hacia arriba el costo de la descarbonización. El 52 por ciento de los casos que presentan estas condiciones son vulnerables y esta vulnerabilidad describe el 41 por ciento de los casos en que los beneficios netos son bajos. Se define mediante las siguientes condiciones (gráfico 4.8):

- **Crecimiento económico bajo:** En esta vulnerabilidad, el crecimiento económico promedio es bajo (2 por ciento anual).
- **Vehículos alternativos relativamente costosos:** El costo de los vehículos eléctricos e híbridos en relación con los vehículos convencionales es alto en esta vulnerabilidad (es decir, la relación entre el costo de los vehículos eléctricos e híbridos y el de los vehículos convencionales supera el 91 por

Gráfico 4.8
Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Alto costo de los vehículos alternativos en condiciones de crecimiento económico bajo”



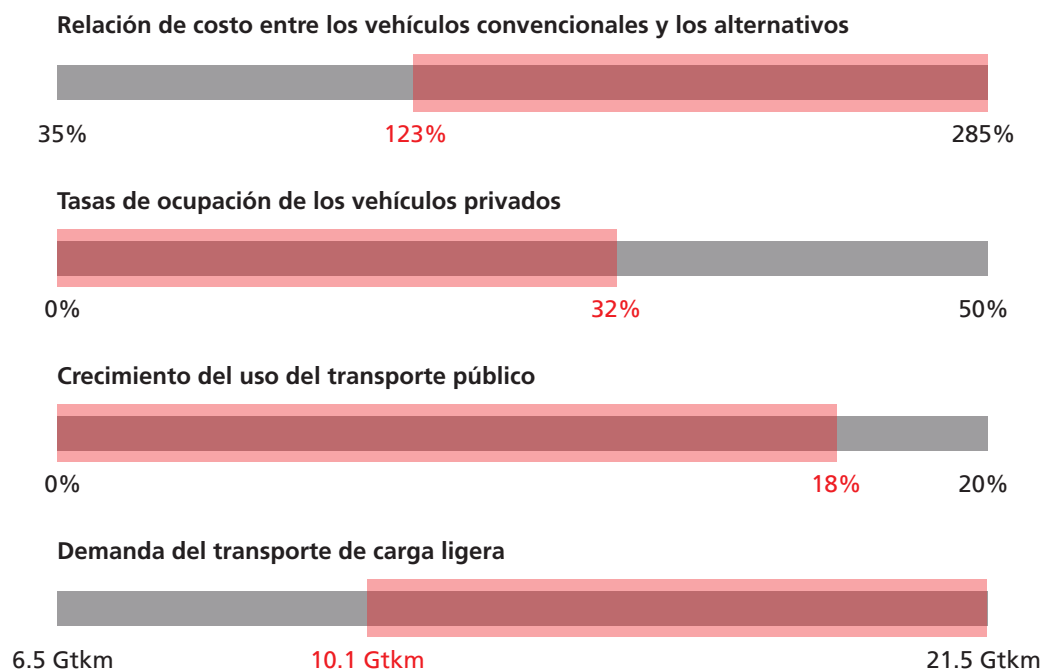
ciento en 2050). La relación actual (año 2018) contemplada en el modelo es de alrededor del 180 por ciento, donde los vehículos de combustibles alternativos cuestan, en promedio, \$39.000 en el caso de los autobuses, \$47.000 en el de los SUV, \$25.000 en el de los sedanes y \$38.000 en el de las minivanas.

Beneficios netos del sector de transporte - Vulnerabilidad 2: “Escaso uso del transporte público, alta demanda del transporte de carga y vehículos eléctricos costosos”: En esta vulnerabilidad, los costarricenses no adoptan en medida suficiente el uso del transporte público y tampoco se incrementa el uso compartido de los vehículos privados. Eso ocasiona mayores costos relacionados con el transporte privado. Una alta demanda del transporte de carga ocasiona mayores costos para electrificar ese subsector. Por último, los costos de los vehículos eléctricos son mayores a lo esperado. El 56 por ciento de los casos que presentan estas condiciones son vulnerables y esta vulnerabilidad describe el 27 por ciento de los casos en que los beneficios netos son bajos. Se define mediante las siguientes condiciones (gráfico 4.9):

- **Vehículos de combustibles alternativos relativamente costosos:** En esta vulnerabilidad, los vehículos de combustibles alternativos siguen siendo relativamente más costosos que los de combustibles convencionales (es decir, la relación entre el costo de los vehículos de combustibles alternativos y los vehículos convencionales supera el 123 por ciento).
- **Tasas de ocupación bajas de los vehículos privados:** En esta vulnerabilidad, el uso compartido de los vehículos privados es bajo: la cantidad promedio de pasajeros en los vehículos privados no aumenta más del 32 por ciento para el año 2050, considerando las condiciones de referencia de 1,8 pasajeros por vehículo.
- **Bajo crecimiento del uso del transporte público:** Futuros en los que el crecimiento del uso del transporte público permanece por debajo del 18 por ciento para 2050.
- **Alta demanda del transporte de carga ligera:** Los futuros en los que la demanda de transporte de carga ligera supera las 10,14 toneladas kilómetro brutas (gtkm, considerando una demanda un 12,5 por ciento inferior a las condiciones de referencia).

En conjunto, estos dos escenarios describen los principales riesgos para lograr beneficios netos positivos sustanciales mediante la implementación del PNdD. El cuadro 4.6 resume estas vulnerabilidades y el Apéndice C brinda más detalles sobre la metodología utilizada, así como estadísticas y definiciones específicas.

Gráfico 4.9
Rango de factores inciertos que definen la vulnerabilidad denominada “Escaso uso del transporte público, alta demanda del transporte de carga y vehículos eléctricos costosos”



Cuadro 4.6
Incertidumbres y definiciones de vulnerabilidades para los beneficios netos bajos en el sector de transporte

Incertidumbres relativas al transporte	Vulnerabilidad 1: “Alto costo de los vehículos alternativos en condiciones de crecimiento económico bajo”	Vulnerabilidad 2: “Escaso uso del transporte público, alta demanda del transporte de carga y vehículos eléctricos costosos”
Demanda de transporte (vinculada al crecimiento económico)	Crecimiento económico bajo: Crecimiento del 2 % del PIB, en promedio.	Alta demanda del transporte de carga ligera: superior a las 10,14 gtkm.
Costos tecnológicos	Vehículos eléctricos e híbridos relativamente costosos: la relación entre el costo de los vehículos eléctricos e híbridos y el de los vehículos convencionales supera el 91 %.	Vehículos eléctricos e híbridos relativamente costosos: la relación entre el costo de los vehículos eléctricos e híbridos y el de los vehículos convencionales supera el 123 %.
Eficiencias de los vehículos	No disponible	Tasas de ocupación bajas de los vehículos privados: el aumento en las tasas de ocupación de SUV, sedanes y minivanes es inferior al 133 %.
Crecimiento de la proporción del transporte no motorizado y del uso del transporte público*	No disponible	Bajo crecimiento del uso del transporte público: inferior al 18 %.

NOTAS: Las variables no contempladas en las vulnerabilidades incluyen el costo de los combustibles, los costos de la infraestructura para la electrificación, los cambios de combustible y los cambios modales; las elasticidades de la demanda de los diferentes modos de transporte y el crecimiento del transporte público eléctrico y de hidrógeno.

Beneficios netos de otros sectores

Luego, identificamos qué condiciones de incertidumbre permitirían obtener beneficios netos bajos para sectores que no son el de transporte. Para este análisis, utilizamos el algoritmo PRIM para identificar qué variables de los siete ejes de acción correspondientes a sectores que no son el de transporte ocasionarían beneficios netos bajos en esos sectores: inferiores a \$11.600 millones, el valor del primer cuartil para los beneficios netos de estos sectores. Consideramos los siguientes tipos de incertidumbres:

- las condiciones económicas según los diferentes escenarios de crecimiento económico (3 factores);
- las emisiones de cada uno de los ejes de acción de los sectores que no son el de transporte para reflejar todas las incertidumbres descritas en el cuadro 2.16 (7 factores);
- los factores de beneficio (27 factores: el total de los siete ejes de acción);
- los factores de costo (20 factores: el total de los siete ejes de acción).

De todas las incertidumbres evaluadas, la variación en los beneficios netos correspondientes a sectores que no son el de transporte se debe, en gran medida, a dos incertidumbres clave. Primero, la incertidumbre en torno a los **beneficios de los servicios ecosistémicos de los bosques húmedos primarios** (línea de acción de soluciones basadas en la naturaleza) es importante porque nuestro modelo estima que el hecho de conservar los bosques primarios y mejorar su gestión acumulará beneficios significativos (alrededor de \$20 mil millones en todos los tipos de bosques, según los supuestos de referencia). Estimar los beneficios de los servicios ecosistémicos también es algo que entraña gran imprecisión. Segundo, la incertidumbre en torno al **costo de electrificar los edificios comerciales y volverlos más eficientes** es importante porque este factor se relaciona estrechamente con una categoría de costos altos (superiores a los \$2 mil millones) y nuestra estimación también es aproximada, lo que la vuelve altamente incierta. Las incertidumbres en torno a otros factores están dominadas por estos dos factores identificados. Cabe recordar que el beneficio neto del PNdD en su conjunto se basa principalmente en el sector de transporte, tal como se describió más arriba.

Los beneficios bajos en los servicios ecosistémicos o los costos altos de electrificar los edificios comerciales y mejorar su eficiencia por sí solos podrían ocasionar beneficios netos bajos. No obstante, enfrentar ambas condiciones al mismo tiempo probablemente generaría beneficios netos bajos para los sectores que no son el de transporte. El cuadro 4.7 resume los análisis cuantitativos de la vulnerabilidad que identificaron estas incertidumbres.

Resumen de las vulnerabilidades del Plan Nacional de Descarbonización

Este capítulo presentó análisis de los beneficios y costos del PNdD costarricense considerando una amplia gama de supuestos plausibles respecto al futuro.

Primero, las cero emisiones netas solo se lograrían con la implementación del PNdD. No hay futuros en los que las emisiones se reduzcan lo suficiente sin políticas e inversiones que impulsen la descarbonización. Sin embargo, el análisis confirma que un mayor crecimiento económico genera emisiones más altas, suponiendo que todo lo demás permanezca igual. Esto sería así incluso con una mayor separación de las emisiones y el crecimiento económico. No obstante, el análisis también indica qué aspectos del PNdD deberían ser especialmente eficaces para garantizar que las emisiones se separen del crecimiento económico y se reduzcan lo suficiente, y que haya beneficios netos significativos para la economía.

Cuadro 4.7
Vulnerabilidades de los beneficios netos no relacionados al transporte

Vulnerabilidad	Umbral y Rango	Estadísticas
"Bajo valor de los servicios ecosistémicos para los bosques húmedos primarios"	Menos de \$20.000 por hectárea al año: Rango = [\$15.000 – 30.000/ha al año].	Explica el 70 por ciento de los casos de beneficios netos bajos (cobertura); casi el 60 por ciento de los casos tienen beneficios netos bajos (densidad).
"Altos costos de electrificar los edificios comerciales y mejorar su eficiencia"	Más del 0,7 % del valor comercial: Rango = [0,1 % - 1,5 % del valor comercial].	Explica el 77 por ciento de los casos de beneficios netos bajos (cobertura); casi el 37 por ciento de los casos tienen beneficios netos bajos (densidad).
"Bajo valor de los servicios ecosistémicos para los bosques húmedos primarios + Altos costos de electrificar los edificios comerciales y mejorar su eficiencia"	<ul style="list-style-type: none"> • Menos de \$21.000 por hectárea al año: Rango = [\$15.000 – 30.000/ha al año]. • Más del 0,7 % del valor comercial: Rango = [0,1 % - 1,5 % del valor comercial]. 	Explica el 59 por ciento de los casos de beneficios netos bajos (cobertura); casi el 73 por ciento de los casos tienen beneficios netos bajos (densidad).

En el sector de transporte, nuestro análisis sugiere que Costa Rica debe prestar especial atención a las incertidumbres en torno tanto a los impulsores de emisiones, costos y beneficios como a los factores que afectan la implementación del PNdD en sí. Evitar o administrar las condiciones específicas que se describen abajo puede ayudar a garantizar que el PNdD tenga mayor resiliencia ante el rápido cambio tecnológico y la volatilidad del actual entorno económico.

De los 91 impulsores de la incertidumbre que consideramos en el análisis, vemos dos tendencias tecnológicas y dos socioeconómicas que son las más relevantes para el sector de transporte:

- el costo de los vehículos de combustibles alternativos;
- la eficiencia en los vehículos que usan combustibles convencionales;
- la demanda de transporte de carga ligera, y
- el uso del transporte público.

Si los costos de los vehículos de combustibles alternativos son altos o el uso eficiente del combustible en los vehículos convencionales es alto, entonces la adopción de los vehículos de combustibles alternativos no será suficiente para lograr la reducción de emisiones necesaria en el sector de transporte. Además, las condiciones que harían que las acciones del sector de transporte generaran beneficios netos bajos incluyen costos altos de los vehículos de combustibles alternativos, alta demanda de transporte de carga ligera y escaso uso del transporte público. Estas condiciones ocasionan tanto costos más altos para lograr la descarbonización necesaria y beneficios más bajos, dado que no es suficiente la reducción en el uso de los vehículos privados que producen mayores consecuencias externas (es decir, accidentes, polución y congestión vehicular).

Este análisis también indica que la efectividad de las siguientes medidas de descarbonización es fundamental para lograr los objetivos de descarbonización y obtener beneficios netos positivos:

- la electrificación del transporte privado;
- la adopción de tecnologías eléctricas y de hidrógeno en el transporte público;
- la electrificación del transporte de carga ligera.

Existe una importante interacción entre los factores inciertos identificados arriba y el crecimiento económico. Por ejemplo, en el caso de la reducción de emisiones, tanto la electrificación del transporte privado como el uso de hidrógeno en el transporte público contribuyen a reducir las emisiones en el transporte. No obstante, en condiciones de alto crecimiento económico, si los vehículos de combustibles alternativos siguen siendo costosos y el uso eficiente del combustible en los vehículos convencionales mejora sustancialmente, reducir el uso de los combustibles fósiles en el sector de transporte será más difícil, al igual que los esfuerzos de Costa Rica por reducir las emisiones a largo plazo. De manera similar para el caso de los beneficios netos, vimos que, si los vehículos alternativos siguen siendo costosos y la economía crece a un ritmo menor, el PNdD igualmente permitiría obtener beneficios netos positivos. De todos modos, los beneficios netos serían más bajos que si el crecimiento económico fuese mayor y brindase una oportunidad más amplia de reducir las consecuencias externas del transporte que surgen de una mayor demanda en este sector.

Para otros sectores, el PNdD podría no lograr emisiones netas que fuesen igual a cero o estuviesen cerca de serlo si las tasas de las emisiones de la industria y la ganadería no se reducen lo suficiente como para compensar una mayor actividad económica. Además, el éxito de la reducción de emisiones mediante el PNdD se apoya en supuestos basados en el potencial de descarbonización que poseen los bosques. Específicamente, si la captura de los bosques primarios es inferior a la esperada, o se reduce a lo largo del tiempo, entonces el sector de soluciones basadas en la naturaleza puede no aumentar la captura en un nivel suficiente como para que se logren cero emisiones netas en toda la economía. También existe cierto riesgo de que los beneficios de la descarbonización sean bajos; específicamente si los beneficios por los servicios ecosistémicos proporcionados por los bosques húmedos primarios son bajos o los costos de electrificar y aumentar la eficiencia energética de los edificios comerciales son altos.

Facilitar la descarbonización en Costa Rica

Este análisis de los beneficios y los costos del PNdD de Costa Rica sugiere que es posible lograr cero emisiones netas y que, además, es algo que podría generar beneficios netos a lo largo de los próximos treinta años. Hay gran incertidumbre en esta proyección, pero notamos que, en la mayoría de los futuros plausibles, este sería el resultado que se obtendría. Los hallazgos de este estudio son importantes para muchos aspectos de las iniciativas de descarbonización de Costa Rica. Primero, pueden ayudar a gestar apoyos para la implementación del PNdD. Segundo, proporcionan información que puede guiar la implementación del PNdD. Por último, las herramientas y los métodos de este estudio se usan para aportar fundamentos al compromiso de descarbonización que Costa Rica renueva para con la comunidad internacional.

Gestar apoyos para el Plan Nacional de Descarbonización

Primero, los hallazgos de este estudio pueden ser útiles para construir una red de apoyo que respalde el PNdD. Al demostrar que la reducción de emisiones también genera beneficios para los costarricenses, este análisis ayuda a justificar los desembolsos iniciales de capital. Sería útil realizar en los próximos años una evaluación más profunda respecto de quiénes se benefician con la descarbonización para asegurar que los beneficios se distribuyan de forma equitativa entre todos los grupos y sectores. Determinar que es muy probable que los beneficios superen los costos también ayuda a atraer inversiones extranjeras para ayudar a financiar los diferentes aspectos del PNdD, tal como mejorar la eficiencia del sector industrial. Por último, si bien los costos relacionados con la descarbonización a corto plazo requerirán financiamiento interno y externo, estas inversiones podrían también generar importantes beneficios económicos a corto plazo mientras Costa Rica se recupera de la pandemia de COVID-19.

Guía para la implementación del Plan Nacional de Descarbonización

Identificamos un pequeño conjunto de riesgos clave para la implementación exitosa, y estos hallazgos proporcionan una importante **guía para la implementación del PNdD**. En particular, el análisis señala posibles acciones de modelado y delimitación (Dewar, 2002; Marchau et al., 2019). En este contexto, las *acciones de delimitación* son aquellas que reducen la sensibilidad del PNdD a las incertidumbres identificadas. Las *acciones de modelado* son aquellas que garantizan que no se produzcan las condiciones poco favorables.

Nuestro análisis del sector de transporte valida, además, la importancia de varios de los principios establecidos en el PNdD. Primero, debe haber un desarrollo exitoso del sistema de transporte público

para que se convierta en el medio elegido para movilizarse en lugar de los vehículos privados. Eso es clave para garantizar que se cumplan los objetivos de reducción de las emisiones, sin incurrir en altos costos. Para eso, Costa Rica deberá ser flexible en el uso de las inversiones y la implementación de las políticas que inducen esa transición del transporte privado al público. Será necesario revisar los planes relativos a las rutas de los autobuses y ajustar los incentivos en respuesta a la cantidad de pasajeros que utilizan el transporte público.

Luego, el análisis destaca la importancia de no esperar simplemente que los avances tecnológicos sucedan y se propaguen por la economía de Costa Rica. Para una implementación exitosa del PNdD, será necesario bajar los precios de los vehículos alternativos y el gobierno de Costa Rica debería supervisar cuidadosamente estas tendencias así como ajustar los incentivos y objetivos para las diferentes tecnologías, según corresponda. Si los costos de los automóviles eléctricos bajan lentamente, el PNdD podría acelerar sus inversiones en el transporte público. Costa Rica también puede beneficiarse de tener una participación más activa en el desarrollo y la producción de algunas de estas tecnologías, aprovechando su fuerza laboral relativamente bien preparada y otras industrias con alta adopción tecnológica (“Costa Rica: A Haven for High Tech Investment”, 2017).

El análisis también destaca la importancia de impulsar activamente la descarbonización a corto plazo. Los riesgos y beneficios del PNdD son mayores si el crecimiento económico es mayor y, cuanto antes crezca la economía de Costa Rica, más importante será la descarbonización. Por ejemplo, el crecimiento de las industrias de Costa Rica debe ir acompañado de mejoras en las eficiencias y de la promoción de los conceptos de la economía circular, lo cual tiene el potencial de reducir las emisiones de forma natural y rentable.

Por último, el análisis destaca las tremendas oportunidades de descarbonización en el sector de la agricultura y la ganadería. Las ganancias más importantes y menos costosas pueden obtenerse deteniendo la deforestación de los bosques primarios intactos para conservar sus valiosos servicios ecosistémicos. Será fundamental mejorar la gestión de los bosques, así como las prácticas agropecuarias, para el éxito del PNdD. Probablemente, Costa Rica necesite experimentar con una variedad de instrumentos de política para garantizar que estas mejoras se sostengan a lo largo de las próximas décadas. No obstante, los beneficios para Costa Rica son enormes, con grandes oportunidades de generar empleos, obtener ganancias en productividad e incrementar los servicios ecosistémicos.

Además, sería útil proponer una formulación más detallada de estos conceptos de delimitación y modelado en la próxima actualización del PNdD. A medida que se desarrolla el PNdD, debería definir más específicamente los objetivos de reducción de las emisiones para cada sector y también indicar si tales objetivos deberían revisarse y en qué momento. Por ejemplo, la tasa de transición de los vehículos de combustibles convencionales a los de combustibles alternativos podría estar conectada al costo relativo de los vehículos alternativos. Una reducción más rápida del costo de los vehículos eléctricos podría acelerar la transición, y viceversa. Los objetivos de otros sectores se ajustarían para compensar y, así, garantizar que se logren las cero emisiones netas a la vez que se mantienen los costos iniciales bajo control. A modo de otro ejemplo, Costa Rica aprenderá de la experiencia cuáles son los costos reales de mejorar las prácticas en los sectores agrícola y forestal para reducir las emisiones de GEI y aumentar la captura de carbono. Si los costos son inferiores a lo esperado, entonces, se garantizarían mayores esfuerzos de descarbonización en estos sectores.

Actualización a la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Costa Rica

Este trabajo también puede ayudar a que Costa Rica actualice su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de conformidad con el Acuerdo de París. Esta actualización está en desarrollo y se completará para diciembre de 2020. Los modelos y el análisis de este estudio ayudan a fundamentar los debates entre las partes interesadas sobre cómo revisar los objetivos de cada sector para maximizar los beneficios potenciales, en particular, los resultados a corto plazo en el empleo y la economía, que son fundamentales para ayudar a Costa Rica a recuperarse de la pandemia de COVID-19. Por ejemplo, nuestro análisis sugiere que evitar más emisiones y tener una mayor captura de carbono en los sectores de agricultura y ganadería son acciones que permitirían compensar parte de los costos potencialmente altos de descarbonizar los edificios y la industria. El gráfico 5.1 muestra una captura de pantalla de la herramienta interactiva desarrollada para ayudar a que las partes interesadas hicieran sus aportes sobre los supuestos clave utilizados en este estudio. Esta plataforma podría actualizarse para apoyar el proceso del PNdD.

Gráfico 5.1

Pantalla de inicio de la herramienta interactiva para revisar los supuestos de modelado para este estudio

UCR
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Tecnológico de Monterrey

BID
Banco Interamericano de Desarrollo

COSTA RICA
GOBIERNO DEL BICENTENARIO
1948-2018

RAND
CORPORATION

Evaluación de Beneficios y Costos de la Descarbonización en Costa Rica

DESCARBONICEMOS COSTA RICA
COMPROMETIENDO PAÍS 2018-2050

PLAN NACIONAL DE DESCARBONIZACIÓN GOBIERNO DE COSTA RICA
2018 -2050

Supuestos del Modelo y Resultados de Emisiones

11 Agosto 2020

Para obtener más información, póngase en contacto:

David Groves (groves@rand.org)
Felipe de Leon (felipe@climatrader.com)
Adrien Vogt-Schilb (avogtschilb@iadb.org)
Jairo Quiros (jairohumberto.quiros@ucr.ac.cr)

Haga clic en los botones rojos a continuación para navegar por las visualizaciones. También puede navegar por las visualizaciones usando las pestañas en la parte superior.

EN
Click here for English version

Instrucciones

CO₂

Bus

Plug

Factory

Recycling

Plant

Cow

Trees

FUENTE: Esta es una captura de pantalla de "Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica", 2020.

NOTA: Se puede acceder a la herramienta interactiva en https://public.tableau.com/profile/rand4185#!/vizhome/SWCHE071-CR_NDP-INPUTS/IntroductionEN.

Mejora de las limitaciones

Existen **limitaciones importantes** en este estudio que podrían mejorarse en los próximos meses y años. Si bien el modelo de los sectores del transporte y la electricidad es bastante avanzado, los modelos desarrollados para representar a los demás sectores son menos sofisticados y pueden mejorarse. Para esto, se requerirán datos adicionales, pero también permitiría representar medidas de descarbonización específicas y respaldar la optimización de estas acciones a lo largo del tiempo, a medida que las condiciones van cambiando. La metodología RDM utilizada para este estudio contempla el proceso de iteración. A medida que **se desarrollan nuevos modelos y se los integra en el marco de trabajo**, será muy fácil actualizar las simulaciones, los análisis y los hallazgos clave en forma oportuna. Por ejemplo, para finales del 2020, se integrará al sistema de modelado un modelo agropecuario más detallado, lo cual permitirá analizar más profundamente las oportunidades y los riesgos de la descarbonizar los sectores de agricultura y ganadería.

Contribución a un programa mayor de políticas sobre descarbonización

Por último, este estudio se enmarca en **un programa más amplio de investigación y política que informa acerca de la descarbonización en toda América Latina**. Específicamente, el abordaje del análisis de políticas de forma tal que (1) sea participativo, (2) tome en cuenta la incertidumbre mediante la evaluación de los posibles futuros y (3) considere opciones de compensación entre los diferentes sectores de rendimiento e incertidumbres es el método que se está usando en Costa Rica y el resto de Latinoamérica. Las herramientas, los datos y la capacidad local empleados en este estudio ya se han usado para un análisis específico sobre el tren eléctrico propuesto para Costa Rica para fundamentar las decisiones gubernamentales respecto de un préstamo de aproximadamente \$500 millones para el proyecto (Dirección de Cambio Climático, 2020). El mismo enfoque de RDM desarrollado para este estudio con el objeto de evaluar la estrategia de descarbonización nacional se está utilizando en Chile, Perú y Colombia.

Referencias

Alpizar, Francisco, Matías Piaggio y Eduardo Pacay: *Valoración económica de los beneficios en la salud asociados a la reducción de la contaminación del aire: El caso del Gran Área Metropolitana de Costa Rica*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), diciembre del 2017.

AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alacantillados): *Plan Nacional de Inversiones en Saneamiento, 2016–2045*, San José, Costa Rica, 2016. Al 7 de octubre del 2020:
<https://www.aya.go.cr/ASADAS/Documents/PLAN%20NACIONAL%20DE%20INVERSIONES%20EN%20SANEAMIENTO%202016-2045.pdf>

AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alacantillados), MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía) y Ministerio de Salud: *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016–2045*, San José, Costa Rica, 2016. Al 12 de octubre del 2020:
<https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Politica%20Nacional%20de%20Saneamiento%20en%20Aguas%20Residuales%20marzo%202017.pdf>

Banco Interamericano de Desarrollo y Programa de Deep Decarbonization Pathways para Latinoamérica y el Caribe, *Getting to Net-Zero Emissions: Lessons from Latin America and the Caribbean*, Washington, D.C., 2019. Al 7 de octubre del 2020:
<https://publications.iadb.org/en/getting-net-zero-emissions-lessons-latin-america-and-caribbean>

Banerjee, Onil y Martin Cicowiez: *The Integrated Economic-Environmental Modeling Platform (IEEM)*, IEEM Platform Technical Guides: User Guide, IDB Technical Note No. 01843, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2019.

Banerjee, Onil y Martin Cicowiez: *The Integrated Economic-Environmental Modeling (IEEM) Platform*, IEEM Platform Technical Guides: IEEM Mathematical Statement, IDB Technical Note No. 01842, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2020.

Banerjee, Onil, Martin Cicowiez, Renato Vargas y Mark Horridge: *Construction of an Extended Environmental and Economic Social Accounting Matrix from a Practitioner's Perspective*, IDB Technical Note No. IDB-TN-01793, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2019.

Bataille, Christopher, Henri Waisman, Yann Briand, Johannes Svensson, Adrien Vogt-Schilb, Marcela Jaramillo, Ricardo Delgado, Ricardo Arguello, Leon Clarke, Thomas Wild, Francisco Lallana, et al.: “Net-Zero Deep Decarbonization Pathways in Latin America: Challenges and Opportunities”, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 30, julio del 2020.

Binsted, Matthew, Gokul Iyer, James Edmonds, Adrien Vogt-Schilb, Ricardo Arguello, Angela Cadena, Ricardo Delgado, Felipe Feijoo, André Lucena, Haewon McJeon, Fernando Miralles-Wilhelm y Anjali Sharma: *Stranded Asset Implications of the Paris Agreement in Latin America and the Caribbean*, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2020.

Bryant, Benjamin P. y Robert J. Lempert: “Thinking Inside the Box: A Participatory, Computer-Assisted Approach to Scenario Discovery”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 77, N.º 1, enero del 2010, pp. 34–49.

Busch, Jonah, Jens Engelmann, Susan C. Cook-Patton, Bronson W. Griscom, Timm Kroeger, Hugh Possingham y Priya Shyamsundar: “Potential for Low-Cost Carbon Dioxide Removal Through Tropical

Reforestation”, *Nature Climate Change*, Vol. 9, 2019, pp. 463–466.

Cavallo, Eduardo A., Andrew Powell y Tomás Serebrisky, eds.: *From Structures to Services: The Path to Better Infrastructure in Latin America and the Caribbean*, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2020.

Coppola, Andrea, Fernando Fernholz y Graham Glenday: “Mexico: Estimation of the Economic Opportunity Cost of Capital for Public Investment Projects: An Empirical Analysis of the Mexican Case”, documento de trabajo de la investigación realizada en apoyo a la formulación de políticas, Washington, D.C.: Banco Mundial, 1 de marzo del 2014.

“Costa Rica: A Haven for High Tech Investment”, *The European*, 16 de julio del 2017. Al 7 de octubre del 2020:

<https://the-european.eu/story-12150/costa-rica-a-haven-for-high-tech-investment.html>

Dewar, James. A., *Assumption-Based Planning: A Tool for Reducing Avoidable Surprises*, RAND Studies in Policy Analysis, Charles Wolf, ed., Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2002.

Dixon, John A.: *Enhanced Cost Benefit Analysis of IDB Waste Water Treatment Projects with Special Consideration to Environmental Impacts: Lessons Learned from a Review of Four Projects*, Discussion Paper N.º IDB-DP-254, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2012.

Dirección de Cambio Climático: *Análisis de costo-beneficio de la descarbonización del sector transporte y la importancia del TRP*, agosto del 2020.

Electric Power and Energy Research Laboratory: “The OSeMOSYS–CR Model”, GitHub, 2020. Al 7 de octubre del 2020:

<https://osemosys-cr.readthedocs.io/en/latest/>

EPERLab: *Ver* Laboratorio de Investigación en Potencia y Energía.

“Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, visualización interactiva en Tableau Public, 2020. Al 7 de octubre del 2020:

https://public.tableau.com/profile/rand4185#!/vizhome/SWCHE071-CR_NDP-INPUTS/IntroductionEN

Fay, Marianne, Stephane Hallegatte, Adrien Vogt-Schilb, Julie Rozenberg, Ulf Narloch y Thomas Kerr.: *Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future*, Washington D.C.: Banco Mundial, 2015.

Forster, Piers M., Harriet I. Forster, Mat J. Evans, Matthew J. Gidden, Chris D. Jones, Christoph A. Keller, Robin D. Lamboll, Corinne Le Quéré, Joeri Rogelj, Deborah Rosen, Carl-Friedrich Schleussner, Thomas B. Richardson, Christopher J. Smith y Steven T. Turnock: “Current and Future Global Climate Impacts Resulting from COVID-19”, *Nature Climate Change*, agosto del 2020.

Garrett-Peltier, Heidi: “Green Versus Brown: Comparing the Employment Impacts of Energy Efficiency, Renewable Energy, and Fossil Fuels Using an Input-Output Model”, *Economic Modelling*, Vol. 61, febrero del 2017, pp. 439–447.

Gillingham, Kenneth y James H. Stock: “The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions”, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 32, N.º 4, tercer trimestre del 2018, pp. 53–72.

Godínez-Zamora, Guido, Luis Victor-Gallardo, Jam Angulo-Paniagua, Eunice Ramos, Mark Howells, Will Usher, Felipe De León, Andrea Meza y Jairo Quirós-Tortós: “Decarbonising the Transport and Energy Sectors: Technical Feasibility and Socioeconomic Impacts in Costa Rica”, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 32, noviembre del 2020.

González-Mahecha, Esperanza, Oskar Lecuyer, Michelle Hallack, Morgan Bazilian y Adrien Vogt-Schilb, “Committed Emissions and the Risk of Stranded Assets from Power Plants in Latin America and the Caribbean”, *Environmental Research Letters*, Vol. 14, N.º 12, 23 de diciembre del 2019.

Gobierno de Costa Rica, *Costa Rica II Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Programa de Cambio Climático, 2019a. Al 7 de octubre del 2020: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/bur2019/>

Gobierno de Costa Rica, *Plan Nacional de Descarbonización 2018–2050*, 2019b. Al 7 de octubre del 2020: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2020/01/PLAN.pdf>

Groves, David G., Evan Bloom, Robert J. Lempert, Jordan R. Fischbach, Jennifer Nevills y Brandon Goshi: “Developing Key Indicators for Adaptive Water Planning”, *Journal of Water Resources Planning and*

Management, Vol. 141, N.º 7, julio del 2015.

Groves, David G., Martha Davis, Robert Wilkinson y Robert J. Lempert: “Planning for Climate Change in the Inland Empire”, *Water Resources IMPACT*, Vol. 10, N.º 4, 2008, pp. 14–17.

Groves, David G. y Robert J. Lempert: “A New Analytic Method for Finding Policy-Relevant Scenarios”, *Global Environmental Change*, Vol. 17, N.º 1, febrero del 2007, pp. 73–85.

Groves, David G., Edmundo Molina-Perez, Evan Bloom y Jordan R. Fischbach: “Robust Decision Making (RDM): Application to Water Planning and Climate Policy”, en Vincent A. W. J. Marchau, Warren E. Walker, Pieter J. T. M. Bloemen y Steven W. Popper, eds.: *Decision Making Under Deep Uncertainty*, Nueva York: Springer, 2019.

Hallegatte, Stephane, Mook Bangalore, Laura Bonzanigo, Marianne Fay, Tamaro Kane, Ulf Narloch, Julie Rozenberg, David Treguer y Adrien Vogt-Schilb: *Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*, Washington, D.C.: Banco Mundial, 2015.

Hepburn, Cameron, Ella Adlen, John Beddington, Emily A. Carter, Sabine Fuss, Niall Mac Dowell, Jan C. Minx, Pete Smith y Charlotte K. Williams, “The Technological and Economic Prospects for CO₂ Utilization and Removal”, *Nature*, Vol. 575, N.º 7781, 2019, pp. 87–97.

Hornik, Kurt, Achim Zeileis, Torsten Hothorn y Christian Buchta: “RWeka: An R Interface to Weka”, R package version, 03-04, 2007. Al 7 de octubre del 2020:
<https://CRAN.R-project.org/package=RWeka>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Al 7 de octubre del 2020:
<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, “Summary for Policymakers”, en *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, 2018. Al 7 de octubre del 2020:
<https://www.ipcc.ch/sr15/>

Fondo Monetario Internacional: *World Economic Outlook, October 2019: Global Manufacturing Downturn, Rising Trade Barriers*, Washington, D.C., 15 de octubre del 2019. Al 12 de octubre de 2020:
<https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2019/10/21/World-Economic-Outlook-October-2019-Global-Manufacturing-Downturn-Rising-Trade-Barriers-48513>

Izquierdo, Alejandro, Philip Keefer, Allen Blackman, Matías Busso, Eduardo Cavallo, Gregory Elacqua, Ana María Ibáñez, Julián Messina, Mauricio Moreira, Carlos Scartascini, Norbert Schady y Tomás Serebrisky: *Emerging from the Pandemic Tunnel with Faster Growth and Greater Equity: A Strategy for a New Social Compact in Latin America and the Caribbean*, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2020.

Karlsson, Mikael, Eva Alfredsson y Nils Westling: “Climate Policy Co-Benefits: A Review”, *Climate Policy*, Vol. 20, 2020, pp. 292–316.

Kaufman, Noah, Alexander R. Barron, Wojciech Krawczyk, Peter Marsters y Haewon McJeon: “A Near-Term to Net Zero Alternative to the Social Cost of Carbon for Setting Carbon Prices”, *Nature Climate Change*, agosto del 2020.

Lempert, Robert J.: “Robust Decision Making (RDM)”, en Vincent A. W. J. Marchau, Warren E. Walker, Pieter J. T. M. Bloemen y Steven W. Popper, eds.: *Decision Making Under Deep Uncertainty*, Nueva York: Springer, 2019, pp. 23–51.

Lempert, Robert J., David G. Groves, Steven W. Popper y Steve C. Bankes: “A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios”, *Management Science*, Vol. 52, N.º 4, 2006, pp. 514–528.

Lempert, Robert J., Steven W. Popper y Steven C. Bankes: *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis*, Santa Mónica, California: RAND Corporation, MR-1626-RPC, 2003. Al 12 de octubre del 2020:
http://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1626

Marchau, Vincent A. W. J., Warren E. Walker, Pieter J. T. M. Bloemen y Steven W. Popper, eds.: *Decision*

Making Under Deep Uncertainty, Nueva York: Springer, 2019.

Molina-Perez, Edmundo, David G. Groves, Steven W. Popper, Aldo I. Ramirez y Rodrigo Crespo-Elizondo: Developing a Robust Water Strategy for Monterrey, Mexico: *Diversification and Adaptation for Coping with Climate, Economic, and Technological Uncertainties*, Santa Mónica, California: RAND Corporation, RR-3017-FAMM, 2019. Al 12 de octubre del 2020:
https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3017.html

Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF: *Valoración de los servicios ecosistémicos que ofrecen siete de los humedales protegidos de importancia internacional en Costa Rica: Palo Verde, Caribe Noreste, Caño Negro, Gandoca Manzanillo, Maquenque, Terraba-Sierpe y Las Baulas*, SINAC/CINPE-UNA/PNUD, 2017.

Quinlan, J. Ross: *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Series in Machine Learning, San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1993.

Ricke, Katharine, Laurent Drouet, Ken Caldeira y Massimo Tavoni, “Country-Level Social Cost of Carbon”, *Nature Climate Change*, Vol. 8, 2018, pp. 895–900.

Riera-Crichton, Daniel, Carlos A. Vegh y Guillermo Vuletin: *Fiscal Multipliers in Recessions and Expansions: Does It Matter Whether Government Spending Is Increasing or Decreasing?* Washington, D.C.: Banco Mundial, 2014.

Saget, Catherine, Adrien Vogt-Schilb y Trang Luu: *Jobs in a Net-Zero Emissions Future in Latin America and the Caribbean*, Banco Interamericano de Desarrollo y la Organización Internacional del Trabajo, 2020.

Stiglitz, Joseph y Nicholas Stern: *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*, Washington, D.C.: Grupo del Banco Mundial, Carbon Pricing Leadership Coalition, 2017.

Naciones Unidas, Acuerdo de París, 12 de diciembre del 2015. Al 7 de octubre del 2020:
https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en

Verspecht, Ann, Valerie Vandermeulen, Erik Ter Avest y Guido Van Huylenbroeck: “Review of Trade-Offs and Co-Benefits from Greenhouse Gas Mitigation Measures in Agricultural Production”, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, Vol. 9, Supl. 1, 2012, pp. 147–157.

Waisman, H., Chris Bataille, Harald Winkler, Frank Jotzo, Priyadarshi Shukla, Michel Colombier, Daniel Bui, Patrick Criqui, Manfred Fischedick, Mikiko Kainuma, et al.: “A Pathway Design Framework for National Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies”, *Nature Climate Change*, Vol. 9, N.º 4, 2019.

Apéndices

Contenido

Abreviaciones.....	v
Apéndice A: Detalles del modelado y los factores relacionados con los costos y beneficios por sector.	
Sector de transporte (ejes 1 a 3).....	A-1
Sector de electricidad (eje 4).....	A-4
Sector de edificios (eje 5).....	A-6
Sector industrial (eje 6).....	A-9
Sector de residuos (eje 7).....	A-14
Sector de agricultura (eje 8).....	A-18
Sector de ganadería (eje 9).....	A-22
Sector de bosques y biodiversidad (eje 10).....	A-24
Referencias del Apéndice A.....	A-30
Apéndice B: Desarrollo de escenarios socioeconómicos.....	B-1
Referencias del Apéndice B.....	B-1
Apéndice C: Detalles del análisis de vulnerabilidades del transporte.....	C-1
Análisis del sector de transporte.....	C-1
Riesgo de emisiones altas en el sector de transporte.....	C-2
Riesgo de beneficios netos bajos por la descarbonización del sector de transporte.....	C-3
Apéndice D. Organizaciones de las partes interesadas.....	D-1

Gráficos

Gráfico A.1. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de transporte	A-2
Gráfico A.2. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de electricidad	A-5
Gráfico A.3. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de edificios	A-8
Gráfico A.4. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector industrial.....	A-12
Gráfico A.5. Esquema del modelo de residuos	A-15
Gráfico A.6. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de residuos.....	A-16
Gráfico A.7. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector agrícola.....	A-20
Gráfico A.8. Proporciones de las emisiones por tipo de animal, año 2018.....	A-22
Gráfico A.9. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector ganadero	A-23
Gráfico A.10. Visualización interactiva de los cambios proyectados en el uso de la tierra desde 2015 hasta 2050, bajo las condiciones sin descarbonización y con el PNdD.....	A-26
Gráfico A.11. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de bosques y biodiversidad	A-27
Gráfico B.1. Esquema de la integración de la plataforma IEEM y el modelo de emisiones de Costa Rica	B-2

Cuadros

Cuadro A.1. Factores de beneficio para el sector de transporte	A-3
Cuadro A.2. Factores de beneficio para el sector de electricidad	A-5
Cuadro A.3. Factores de costo del sector de electricidad	A-6
Cuadro A.4. Factores de beneficio para el sector de edificios	A-9
Cuadro A.5. Factores de costo del sector de edificios	A-9
Cuadro A.6. Factores de beneficio para el sector industrial.....	A-13
Cuadro A.7. Factores de costos para el sector industrial.....	A-14
Cuadro A.8. Factores de beneficio para el sector de residuos.....	A-17
Cuadro A.9. Factores de costo del sector de residuos	A-18
Cuadro A.10. Factores de beneficio para el sector agrícola	A-21
Cuadro A.11. Factores de costos para el sector agrícola	A-21
Cuadro A.12. Factores de beneficio para el sector ganadero	A-24
Cuadro A.13. Factores de costos para el sector ganadero.....	A-24
Cuadro A.14. Factores de beneficio para el sector de bosques y biodiversidad	A-28
Cuadro A.15. Factores de costos para el sector de bosques y biodiversidad	A-29
Cuadro C.1. Análisis del descubrimiento de escenarios para el riesgo de emisiones altas en el sector de transporte	C-2
Cuadro C.2. Resultados del descubrimiento de escenarios en relación con el riesgo de beneficios netos bajos por la descarbonización del sector de transporte	C-3

Abreviaciones

CO ₂	dióxido de carbono
CR-IDPM	Modelo Integrated Decarbonization Pathways para Costa Rica
PIB	Producto interno bruto
GEI	gas de efecto invernadero
GJ	gigajulios
Gpkm	miles de millones de pasajero-kilómetros (giga pasajero-kilómetros)
Gtkm	tonelada kilómetro bruta
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IEEM	Plataforma de Modelación Económico-Ambiental Integrada (Integrated Economic-Environmental Modeling)
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agencia Internacional de las Energías Renovables)
kWh	kilovatio hora
MtCO ₂ e	megatonnes de dióxido de carbono equivalente
PNdD	Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica
OSeMOSYS-CR	Sistema de modelado de energía de código abierto de Costa Rica
PJ	petajulios
PRIM	Método de inducción llamado “Patient Rule Induction”
RDM	Toma de decisiones robusta (Robust Decision Making)
vkm	vehículo-kilómetro

Apéndice A: Detalles del modelado y los factores relacionados con los costos y beneficios por sector

Este apéndice proporciona detalles adicionales sobre los modelos desarrollados para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de Costa Rica, así como los beneficios y costos de implementar el Plan Nacional de Descarbonización.

Sector de transporte (ejes 1 a 3)



El sector de transporte se modela utilizando una plataforma de modelado de energía de código abierto (OSeMOSYS-CR)¹ que los investigadores de la Universidad de Costa Rica configuraron para representar el sector de electricidad y transporte costarricense. Como parte de este trabajo, desarrollamos un conjunto de supuestos para reflejar las incertidumbres del futuro. Para integrar este modelo en el marco de trabajo CR-IDPM, tomamos las estimaciones independientes previamente realizadas sobre la demanda de electricidad en los sectores que no son el de transporte y las reemplazamos por vínculos a los modelos de los otros sectores. También incluimos variaciones en la demanda del transporte compatibles con tres proyecciones económicas de la plataforma IEEM para Costa Rica.

Proyección de emisiones, beneficios y costos del sector de transporte

Dado el nivel de sofisticación del modelo OSeMOSYS-CR, se utilizan muchos supuestos para estimar las emisiones futuras del sector de transporte en las condiciones “sin descarbonización”. Los principales supuestos son aquellos vinculados a lo siguiente.

- costo de los combustibles²;
- costos de la infraestructura para la electrificación, los cambios de combustible y los cambios modales;
- costos tecnológicos;
- elasticidades de la demanda de los diferentes medios de transporte y
- tasas de adopción de nuevas tecnologías.

Para modelar los efectos del PNdD en las emisiones de transporte, definimos los factores que afectan el crecimiento de los siguientes parámetros:

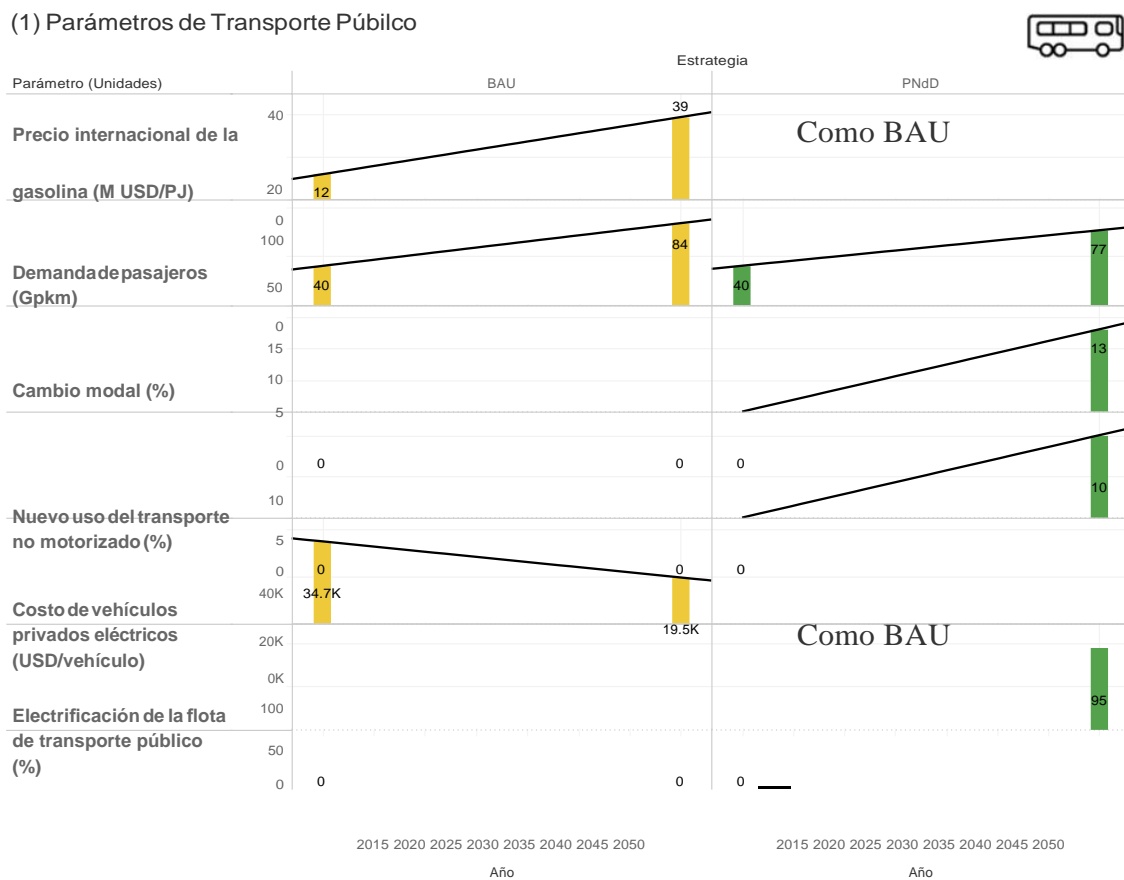
¹ Los detalles del modelo OSeMOSYS-CR están disponibles en el Laboratorio de Investigación en Potencia y Energía (EPERLab), 2020.

² Todos los costos del informe principal y de estos apéndices están expresados en dólares estadounidenses.

- crecimiento del transporte público eléctrico,
- crecimiento del transporte público basado en hidrógeno,
- crecimiento del transporte privado eléctrico,
- crecimiento del transporte de carga ligera eléctrico,
- crecimiento del transporte de carga pesada eléctrico,
- crecimiento del transporte de carga pesada basado en hidrógeno,
- aumento de la proporción de uso del transporte público y
- aumento de la proporción del transporte no motorizado.

El gráfico A.1 muestra los principales supuestos de referencia sobre los que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD para el sector de transporte público.³ El vínculo detallado en las notas del gráfico permite ver las visualizaciones interactivas para los tres subsectores de transporte y las estimaciones de emisiones relacionadas.

Gráfico A.1. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de transporte



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica los supuestos de referencia de la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”.

³ En el informe principal, utilizamos los términos “sin descarbonización” y “con la implementación del PNdD” para referirnos a nuestras dos estimaciones. En la herramienta interactiva que desarrollamos (“Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020), la estimación “sin descarbonización” está indicada como “BAU” (por “baseline assumptions”, o supuestos de referencia) y la estimación “con la implementación del PNdD” está indicada como “NDP”

(por el nombre del PNDD en inglés).

Cuantificación de los beneficios

Los beneficios de transporte incluyen lo siguiente:

- costo social reducido de las emisiones de carbono, lo cual refleja los efectos sobre el clima de este país específico;
- reducción de los impactos de la polución sobre la salud;
- reducción de los costos médicos por accidente, y
- mayor productividad debido a una menor congestión vehicular.

Cuadro A.1. Factores de beneficio para el sector de transporte

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Ahorros en el área de salud debido a la reducción de las emisiones.	Costo por tonelada de contaminante por cantidad de combustible consumido.	\$0,0263 por litro (gasolina) \$0,3141 por litro (diésel)	Coady et al., 2019, p. 39.
Reducción en los costos médicos por accidente.	Costos por muerte (CD) \$738.130 y costo por lesión (CI) \$179.260, extraído de los informes técnicos proporcionados por el gobierno de Costa Rica, ajustado por (1) cantidad de muertes y lesiones por tipo de vehículo y (2) total país (CD y CI corresponden al Gran Área Metropolitana).	\$56,19 millones por Gpkm (vehículos privados) \$1,27 millones por Gpkm (vehículos de transporte público) \$555,55 millones por Gpkm (motocicletas)	COSEVI, 2017.
Mayor productividad debido a una menor congestión vehicular.	Congestión causada por vkm, por tipo de vehículo.	\$0,046 por vkm (vehículos ligeros y motocicletas) \$0,09 por vkm (vehículos pesados)	Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, y Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2017.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el "supuesto de referencia" en negrita

Estimaciones de costos

El modelo OSeMOSYS-CR estima los costos para el sector de transporte utilizando un conjunto amplio de parámetros de costos que reflejan los costos de la inversión inicial y los costos relacionados con el mantenimiento. Un análisis de costos detallado complementario (Haro et al., 2019) proporciona estimaciones basadas en otra metodología, pero con resultados similares.

Sector de electricidad (eje 4)



Actualmente, el sector de electricidad en Costa Rica es renovable casi en su totalidad, basado en altos niveles de energía hidroeléctrica instalada y algunos desarrollos de energía geotérmica, eólica y solar. El PNdD incluye acciones para lograr y mantener una capacidad que sea completamente renovable para contribuir a la electrificación de la industria y el transporte. El sector de electricidad se modela utilizando la misma plataforma de modelado de energía de código abierto (OSeMOSYS-CR) que los investigadores de la Universidad de Costa Rica configuraron para representar el sector de electricidad y transporte costarricense. La demanda de electricidad correspondiente a los sectores de edificios, industrial y agrícola se estima de forma independiente fuera del modelo OSeMOSYS-CR. Las demandas de electricidad históricas y proyectadas basadas en los supuestos de referencia se generaron utilizando datos de Gallardo (2018). Se pasan estas estimaciones de la demanda al modelo OSeMOSYS-CR, el cual también calcula la demanda de electricidad del sector de transporte. Luego, el modelo OSeMOSYS determina cuánto de la electricidad necesaria pueden aportar las fuentes renovables y cuánto las fuentes de generación de electricidad que producen emisiones de carbono, y estima las emisiones de GEI correspondientes.

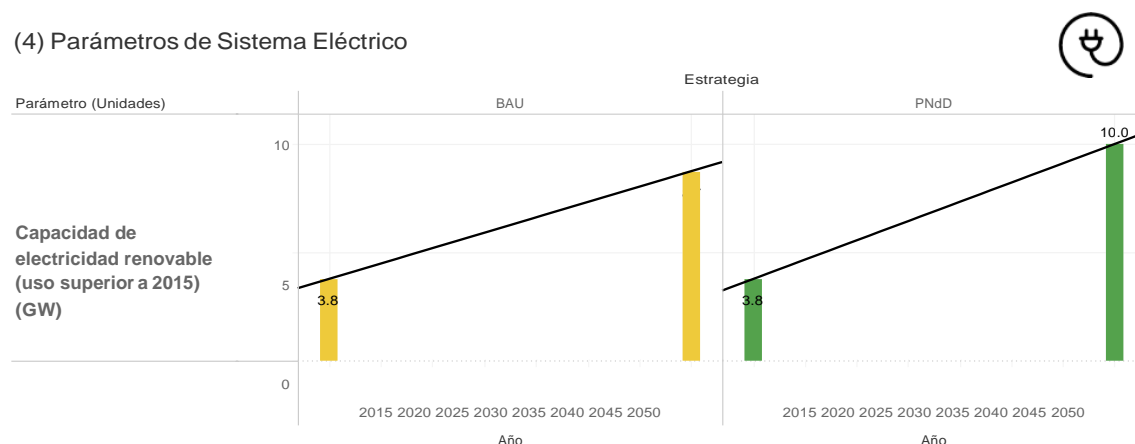
Proyección de las emisiones del sector de electricidad

El modelo OseMOSYS-CR incluye estimaciones sobre la capacidad de generación de electricidad renovable y los factores de emisiones de GEI para representar las instalaciones existentes en Costa Rica que generan electricidad no renovable.

La plataforma OSeMOSYS-CR incluye supuestos sobre la capacidad renovable adicional que se desarrollaría como parte del PNdD para garantizar que el sector de electricidad sea renovable en su totalidad para el 2050. El gráfico A.2 muestra los principales supuestos de referencia en que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD para el sector de electricidad. Siga el vínculo que se detalla en las notas del gráfico para ver la visualización interactiva.

Gráfico A.2. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de electricidad

(4) Parámetros de Sistema Eléctrico



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”. GW = gigavatios.

Cuantificación de los beneficios

Hay una variedad de beneficios que surgen de mantener el alto nivel de renovables en el sector de electricidad, incluyendo evitar la importación de combustibles costosos y sus impactos sobre la generación de emisiones. Para este análisis, cuantificamos los beneficios relativos a reducir el costo social de las emisiones de carbono y a reducir los impactos sobre la salud de evitar el uso de fuentes no renovables para generar electricidad. Los beneficios para los usuarios de pasar a una electricidad de bajo costo se contabilizan en los sectores que utilizan electricidad. Para todos los sectores, también combinamos el cambio en las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD y con un costo del factor de carbono derivado de la literatura pertinente. El valor nominal es \$0,608 por tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Cuadro A.2. Factores de beneficio para el sector de electricidad

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Ahorros en el área de salud debido a la reducción de las emisiones.	Costo por tonelada de contaminante por cantidad de combustible consumido.	\$0,0263 por litro (gasolina) \$0,3141 por litro (diésel)	Coady et al., 2019, p. 39.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el “supuesto de referencia” en negrita

Estimaciones de costos

El modelo OSeMOSYS-CR estima los costos para el sector de electricidad utilizando un conjunto de parámetros de costos que reflejan los costos de la inversión inicial y los costos relacionados con el mantenimiento.

Cuadro A.3. Factores de costo del sector de electricidad

Descripción	Factor	Valor	Fuente
Costos para aumentar la transmisión o la capacidad de distribución por unidad de energía.	Costo por PJ (promedio histórico según datos del Instituto Costarricense de Electricidad [ICE]). Se supone que el costo de la transmisión y la distribución es igual a modo de referencia, aunque la literatura pertinente sugiere que las ampliaciones de la distribución significan costos más altos.	\$29,23 millones por PJ.	ICE, 2017.
Costos de la capacidad adicional de las centrales eléctricas.	En el caso de energía solar y eólica, las trayectorias de costos se extraen de IRENA (2017, 2019). También se considera el costo adicional de almacenamiento por unidad de capacidad. Para los tipos de centrales restantes, se consideran los costos de instalación (costos overnight) del modelo TIMES-CR (DecisionWare Group LLC, 2017), que utilizó datos ICE.	\$2.463,28 millones por PJ (biomasa)	Datos ICE y proyecciones de International Renewable Energy Agency (IRENA, Agencia Internacional de las Energías Renovables).
		\$1.269,78 millones por PJ (diésel)	
		\$4.650,33 millones por PJ (aceite combustible)	
		\$7.828,28 millones por PJ (geotérmica)	
		\$8.241,97 millones por PJ (represa hidroeléctrica)	
		\$4.385,15 millones por PJ (hidroeléctrica sin almacenamiento)	
		\$1.900 (1.553,5) millones por PJ (solar)	
\$2.500 (2.153) millones por PJ (eólica)			

NOTA: Los costos indicados entre paréntesis corresponden al año 2050

Sector de edificios (eje 5)



El modelo del sector de edificios estima las emisiones de GEI de los edificios residenciales y comerciales. Para calcular las emisiones de los edificios residenciales, se combinan las estimaciones de la cantidad de hogares con las estimaciones de las tasas de uso de energía por hogar, el porcentaje de energía utilizada correspondiente a la electricidad y los factores de carbono para el uso de energía no eléctrica. Para calcular las emisiones fijas de los edificios comerciales, se combinan las estimaciones de la actividad económica comercial con las estimaciones de las tasas de uso de energía, el porcentaje de energía

utilizada correspondiente a la electricidad y los factores de carbono en el valor agregado por dólar para el uso de energía no eléctrica.

Proyección de las emisiones de edificios

La ecuación básica utilizada para estimar las emisiones futuras de los edificios es la siguiente:

$$E_t = A_t d_t (1 - \lambda_t) f_t$$

donde:

- E = emisiones [MtCO₂e]
- A = cantidad de viviendas, valor de los resultados comerciales [millones de dólares estadounidenses]
- d = demanda de energía por actividad por sector [PJ por hora o PJ por millón de dólares estadounidenses]
- f = factor de emisiones fijas (p. ej., por cocinar [MtCO₂e/PJ])
- λ = fracción de energía ingresada por electricidad [0 ≤ λ ≤ 1]
- t = recorte de tiempo

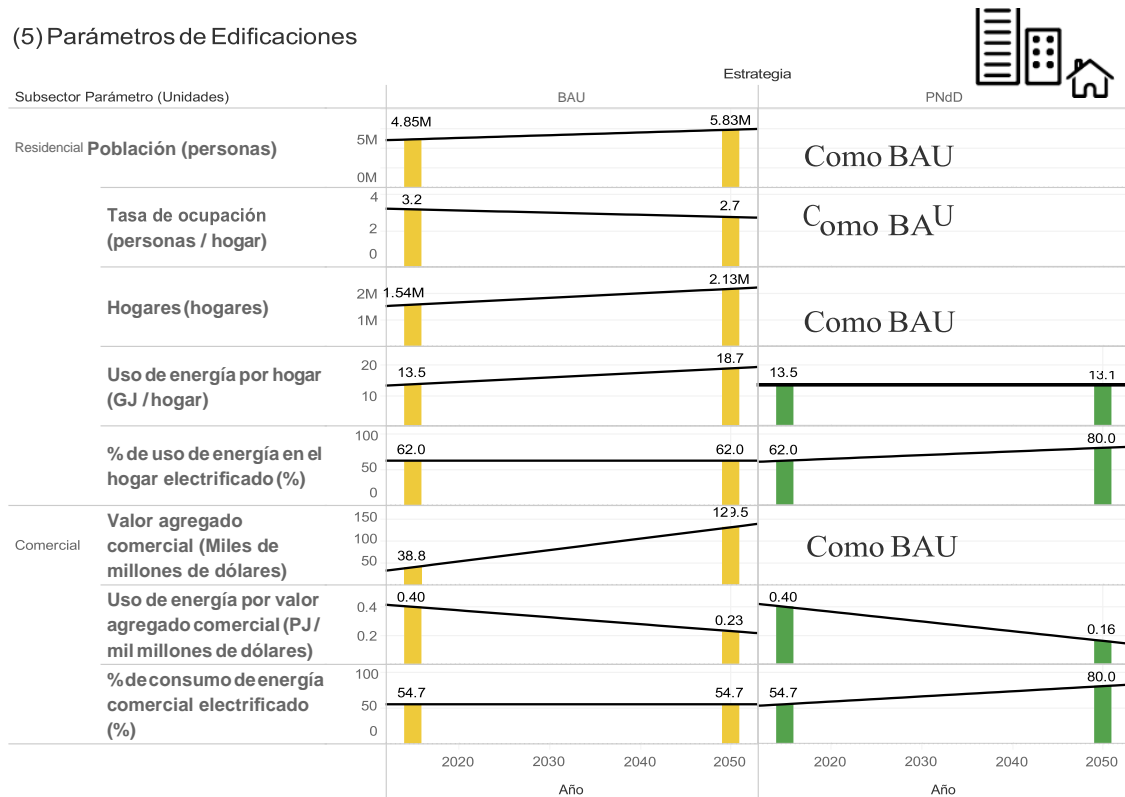
Para estimar la cantidad de casas en el futuro, se utiliza una relación histórica entre la cantidad de viviendas, el producto interno bruto (PIB) y la población. Combinamos la proyección de población de la plataforma IEEM (escalada de forma muy modesta para igualar la estimación de población del Banco Mundial [2017]) con las proyecciones de PIB de IEEM y la relación histórica para calcular la cantidad de casas en el futuro. Para estimar la actividad económica comercial futura, aplicamos tasas de crecimiento por sector extraídas de la plataforma IEEM a las estimaciones de valor agregado recientes generadas por el Banco Mundial.

La demanda de energía de las viviendas y la actividad comercial se divide en la porción que utiliza electricidad y la porción que emplea combustibles fósiles de uso in situ, como el gas natural. Se pasa la demanda de electricidad al modelo del sector de electricidad (OSeMOSYS-CR) y se utilizan factores de emisiones para modelar las emisiones fijas asociadas con la demanda de energía no satisfecha por la electricidad. Para calcular las emisiones de los edificios comerciales, se combinan las estimaciones de la actividad económica comercial generadas por la plataforma IEEM con las estimaciones de las tasas de uso de la energía, el porcentaje de energía utilizada correspondiente a la electricidad y los factores de carbono para el uso de energía no eléctrica.

El gráfico A.3 muestra los principales supuestos de referencia en que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNDD. Vaya al vínculo que se detalla en las notas del gráfico para ver las visualizaciones interactivas, donde se incluyen estimaciones de las emisiones y rangos para los valores de entrada.

Gráfico A.3. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de edificios

(5) Parámetros de Edificaciones



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”.

Cuantificación de los beneficios

Los beneficios de reducir las emisiones de GEI en el sector de edificios incluyen aquellos que surgen por el menor costo social de las emisiones de GEI y ahorros de costos por pasar del uso de gas natural y propano a una electricidad de menor costo. El cuadro A.4 resume los parámetros utilizados para calcular estos beneficios.

Cuadro A.4. Factores de beneficio para el sector de edificios

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Ahorros en los costos de la energía para los operadores de edificios por el cambio a la electricidad de bajo costo (en edificios residenciales y comerciales).	Diferencia en los costos de la energía de fuentes eléctricas y no eléctricas.	Electricidad: (2018) \$0,14 por kWh; (2050, sin descarbonización) [\$0,06; \$0,08 ; \$0,12] por kWh; (2050, con el PNdD) [\$0,03; \$0,05 ; \$0,08] por kWh GLP: (2018) \$13,4 millones por PJ; (2050) [\$10,1; \$20,3 ; \$30,1] millones por PJ	Se utiliza la plataforma OSeMOSYS-CR para calcular los costos de la electricidad. Los precios de la energía de fuentes no eléctricas se representan mediante proyecciones de costos del propano y el butano extraídas de “Precios Históricos” de RECOPE (RECOPE, sin fecha).

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el “supuesto de referencia” en negrita.

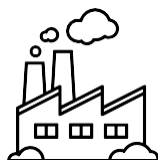
Las estimaciones de los costos por descarbonizar el sector de edificios se basan en una estimación simple del costo por electrificar cada vivienda y mejorar su eficiencia energética y el costo por cada valor agregado comercial de electrificar los edificios comerciales y mejorar su eficiencia energética. Ambos factores entrañan gran incertidumbre.

Cuadro A.5. Factores de costo del sector de edificios

Costo	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuente
Costos de mejorar la eficiencia y la electrificación de las viviendas.	Costo por vivienda.	[\$400, \$575 , \$850] por vivienda	Valor de referencia basado en estimaciones de aumentar la eficiencia energética de las viviendas, multiplicado por alrededor de 3 veces para considerar la electrificación. Institute for Electric Efficiency, 2011, Cuadro 2, p. 14. Rango: criterio del autor.
Costos de mejorar la eficiencia y la electrificación de los edificios comerciales.	Costo por valor agregado comercial de 2020.	[0,1%, 0,5% , 1,5%] de valor agregado en 2020	No hay fuentes disponibles. Por eso, utilizamos un rango amplio con un supuesto de referencia del 0,5 por ciento.

NOTA: Los costos indicados entre paréntesis corresponden al año 2050

Sector industrial (eje 6)



El modelo del sector industrial estima las emisiones de GEI a partir de la energía utilizada como entradas al sector industrial (energía eléctrica y no eléctrica), las emisiones generadas por los procesos industriales (p. ej., las liberaciones de CO₂ causadas por la fabricación de cemento) y las emisiones debidas al uso de materiales industriales, como los refrigerantes y la electrónica. Supone la utilización de materias primas recicladas, como vidrio y metales, para reemplazar la producción de materiales vírgenes. La

reducción de las emisiones por recurrir al reciclaje en lugar de la producción de materiales vírgenes se refleja en el sector de residuos, como emisiones negativas asociadas con los residuos reciclados. Esta representación de la “economía circular” garantiza que la reducción de las emisiones no se contabilice por duplicado.

Proyección de las emisiones industriales

Para proyectar las emisiones por entrada de energía, se combinan las estimaciones de las actividades industriales, de fabricación y minería (en términos de valor económico agregado) generadas por la plataforma IEEM con las estimaciones de la demanda de energía por valor agregado, el porcentaje de energía suministrado por fuentes no eléctricas y un factor de emisiones de GEI para el uso de energía no eléctrica. Las emisiones asociadas con el uso de la electricidad se reflejan en el sector de electricidad. Las emisiones por proceso se estiman para las cuatro actividades que generan más emisiones:

la producción de cemento, vidrio, cal y carburos. Las estimaciones recientes de la producción de cemento provienen del Servicio Geológico de Estados Unidos (sin fecha). Para calibrar los factores de las emisiones relacionadas con el cemento según las condiciones industriales de Costa Rica, se dividen las estimaciones recientes del BUR por las estimaciones de producción. Para estimar los factores correspondientes a las emisiones de vidrio, cal y carburos, se dividen las emisiones recientes del BUR por las estimaciones de valor agregado de fabricación (vidrio y carburos) o construcción y minería (cal) de 2015 proporcionadas por el Banco Mundial (2020). Las proyecciones a futuro de la producción (de cemento) y valor agregado (de vidrio, cal y carburos) se basan en valores tomados de la plataforma IEEM.

Las emisiones por uso incluyen aquellas relacionadas con el uso de sustancias químicas y equipos de todo el sector industrial. Modelamos las emisiones a partir del uso de refrigeración y aire acondicionado, carbonato de sodio, aceite y lubricantes, aerosoles, equipos electrónicos, ceras de parafina y sustancias químicas para la extinción de incendios. Se proyecta un aumento proporcional en el uso de estas sustancias químicas y equipos como estimaciones del valor agregado industrial de la plataforma IEEM. Estas estimaciones se combinan con los factores de emisiones de GEI, los cuales se calculan dividiendo las estimaciones recientes de las emisiones por uso extraídas del BUR por las estimaciones recientes de valor agregado industrial.

El conjunto de ecuaciones básicas utilizado para estimar las emisiones industriales futuras es el siguiente:

$$E_t = I_t + U_t + P_t^{other} + P_t^{cement}$$

donde:

$$I_t = A_t d_t (1 - \lambda_t) f_t ,$$

$$U_t = A_t r_t ,$$

$$P_t^{other} = \sum_i A_{it} r_{it} ,$$

y

$$P_t^{cement} = A_{cement,t} p_t m_t$$

donde:

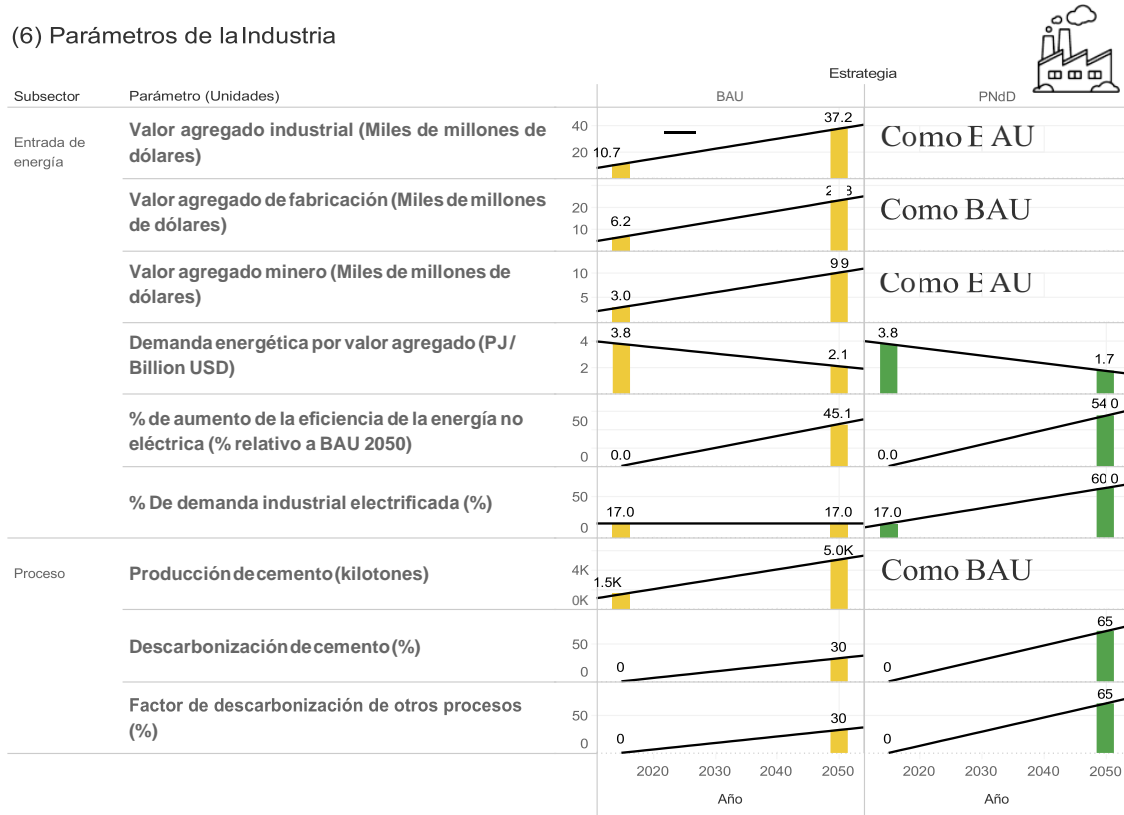
- E = emisiones [MtCO₂e]
- A = valor de la producción industrial (de IEEM; A_i es el valor agregado por sector de la industria) [en millones de USD]
- I = emisiones por uso de energía industrial [MtCO₂e]
- P_{other} = emisiones de proceso de los sectores de la industria no relacionados con la fabricación de cemento [MtCO₂e]
- P_{cement} = emisiones de proceso relacionados con la fabricación de cemento [MtCO₂e]
- U = emisiones por el uso de productos industriales (refrigerantes, electrónica, hidrofluorocarburos, aceite y lubricantes, etc.) [MtCO₂e]
- d = demanda de energía por actividad [PJ por millón de USD]
- f = factor de emisiones de energía industrial por demanda de energía [MtCO₂e por PJ]
- m = factor de emisiones relacionados con la fabricación de cemento [MtCO₂e/Kt de cemento producido]
- p = producción de cemento por actividad [Kt de cemento producido por millón de USD]
- r = factor de emisiones de proceso por sector de la industria i [MtCO₂e por millón de USD]
- λ = fracción de energía ingresada por electricidad [0 ≤ λ ≤ 1]
- i = industria [i = producción de vidrio, cal, carburos]
- t = recorte de tiempo

Para modelar las emisiones de proceso, combinamos las estimaciones de producción futura con los factores de emisión de carbono. Las estimaciones de producción futura se derivan de las estimaciones sobre el valor de producción futura de la plataforma IEEM para cemento, vidrio y cal. Para modelar las emisiones de las entradas de energía en el sector industrial (de fuentes eléctricas y no eléctricas), estimamos el total de energía requerida, la demanda de energía satisfecha por la electricidad y los factores de emisión de carbono de la demanda satisfecha por fuentes no eléctricas. Por último, para modelar las emisiones correspondientes al uso de productos industriales, como lubricantes y refrigerantes, combinamos las estimaciones del valor de producción industrial con las emisiones por factores de valor económico.

El gráfico A.4 muestra los principales supuestos en que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD. Vaya al vínculo que se detalla en las notas del gráfico para ver las visualizaciones interactivas, donde se incluyen estimaciones de las emisiones y rangos para los valores de entrada.

Gráfico A.4. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector industrial

(6) Parámetros de la Industria



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRR633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNDD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNDD”.

Cuantificación de los beneficios

Los beneficios de reducir los GEI en el sector industrial incluyen aquellos que surgen por el menor costo social de las emisiones de GEI, los ahorros en cuestiones de salud por reducir la contaminación causada por el uso y la combustión de combustibles fósiles y los ahorros en los costos por pasar a una electricidad de menor costo.

Cuadro A.6. Factores de beneficio para el sector industrial

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Ahorros en el área de salud debido a la reducción de las emisiones.	Costo por tonelada de contaminante por cantidad de combustible consumido.	\$0,0263 por litro (gasolina) \$0,3141 por litro (diésel)	Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, y Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, 2017.
Ahorros de costos para los productores industriales al cambiar a una electricidad de bajo costo.	Diferencia en los costos de la energía de fuentes eléctricas y no eléctricas.	Electricidad: (2018) \$0,14 por kWh; (2050, sin descarbonización) [\$0,06; \$0,08 ; \$0,12] por kWh; (2050, con el PNdD) [\$0,03; \$0,05 ; \$0,08] por kWh GLP: (2018) \$13,4 millones por PJ; (2050) [\$10,1; \$20,3 ; \$30,1] millones por PJ	Se utiliza la plataforma OSeMOSYS-CR para calcular los costos de la electricidad. Los precios de la energía de fuentes no eléctricas se representan mediante proyecciones de costos del propano y el butano extraídas de “Precios Históricos” de RECOPE (RECOPE, sin fecha).
Incremento de la productividad industrial por contar con mejores procesos y eficiencias.	Aumento del valor de porcentaje como función del porcentaje de emisiones de GEI reducidas.	[10%, 33% , 45%] Ejemplo: El 33% indica que, por cada 10% de reducción de las emisiones de GEI, habría una mejora en el valor del orden del 3,3%.	No hay fuentes disponibles. Por eso, utilizamos un rango amplio con un supuesto de referencia del 33%. Informado por Wang et al. (2020), Rissman et al. (2020) y Talaei et al. (2019).
Ahorro de costos por procesar vidrio y metal reciclados en lugar de la producción de materiales vírgenes.	Contabilizado en el sector de residuos.		

Estimaciones de costos

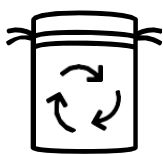
Los costos de implementar las acciones del PNdD en el sector industrial son aproximadamente los que se requieren para reducir las emisiones por fabricación de cemento, que es la principal fuente de emisiones.

Cuadro A.7. Factores de costos para el sector industrial

Costo	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuente
Costos de reducir las emisiones por la fabricación de cemento.	Costo adicional de producir cemento. Incluye programas para aumentar los materiales mixtos, mejorar la eficiencia energética, tecnologías de captura del carbono y recuperación del calor.	[\$30, \$88 , \$176] por tonelada de cemento	Límite superior para el cemento: Fishedick et al., 2014, Capítulo 10, p. 768. Límite inferior para el cemento: McKinsey & Company, 2010.
Costo de reducir las emisiones por uso de productos industriales.	Porcentaje del valor industrial.	[0,3%; 0,5% ; 1,5%] de valor industrial con la implementación completa (2050)	No hay fuentes disponibles. Por eso, utilizamos un rango amplio con un supuesto de referencia del 0,5 por ciento.
Costo de aumentar la eficiencia energética.	El costo de la eficiencia energética suele expresarse en términos de \$ por energía ahorrada.	[\$3, \$5 , \$10] por GJ	La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONU DI, 2014) muestra una curva de costos para la eficiencia energética industrial en China. El rango de acciones se encuentra aproximadamente entre \$0 y \$9 por GJ ahorrado.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el "supuesto de referencia" en negrita.

Sector de residuos (eje 7)



Los ahorros de emisiones de GEI en el sector de residuos se pueden conseguir mediante la reducción de las emisiones generadas por los residuos sólidos y líquidos en su proceso de descomposición o tratamiento. También se pueden lograr reintroduciendo materias primas en la economía que, de no provenir del reciclaje, deberían obtenerse a partir de fuentes vírgenes mediante procesos que generan emisiones de GEI. Modelamos ambas situaciones empleando una metodología bien establecida en las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006). El modelo considera lo siguiente:

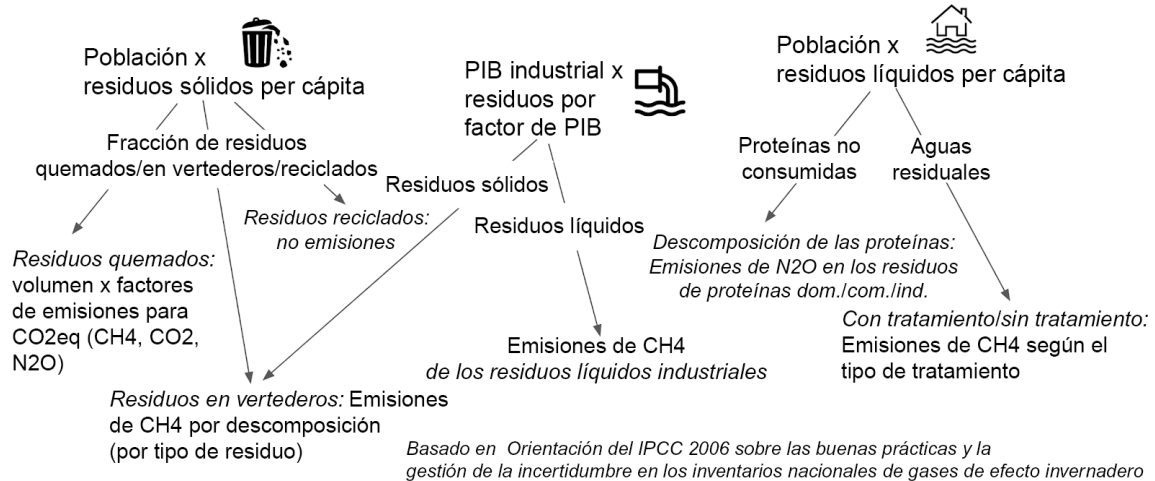
- los residuos sólidos generados per cápita,
- los residuos líquidos domésticos e industriales generados per cápita,
- los residuos sólidos industriales generados por unidad de producción y
- los factores de emisión de GEI neta que contabilizan las emisiones evitadas por haber reemplazado los materiales vírgenes por contenido reciclado o compostado.

La cantidad de residuos generados por el sector residencial es proporcional a la población y la cantidad de residuos generados por el sector industrial es proporcional a las estimaciones de producción indicadas en la plataforma IEEM. Los residuos sólidos están desagregados por subtipo: madera, papel, comida, etc., según si se quema, se envía a vertedero, se recicla, se composta o se desconoce su destino. Cada caso tiene sus propias ecuaciones para indicar las emisiones. Los residuos líquidos pueden descargarse en el ambiente o enviarse a plantas de tratamiento, drenajes sin tratamiento, letrinas o tanques sépticos. Cada uno de estos estados finales se relaciona con distintos factores de corrección de metano en las ecuaciones de residuos líquidos. En las ecuaciones de reciclaje, algunos tipos de

residuos sólidos (como el aluminio) se asocian con factores de emisión neta negativa que representan una reducción en las emisiones correspondientes a la producción virgen.

El gráfico A.5 muestra el esquema básico de los cálculos utilizados en el modelo.

Gráfico A.5. Esquema del modelo de residuos



FUENTE: Basado en IPCC, 2006.

NOTAS: CH4 = metano, N2O = óxido nitroso.

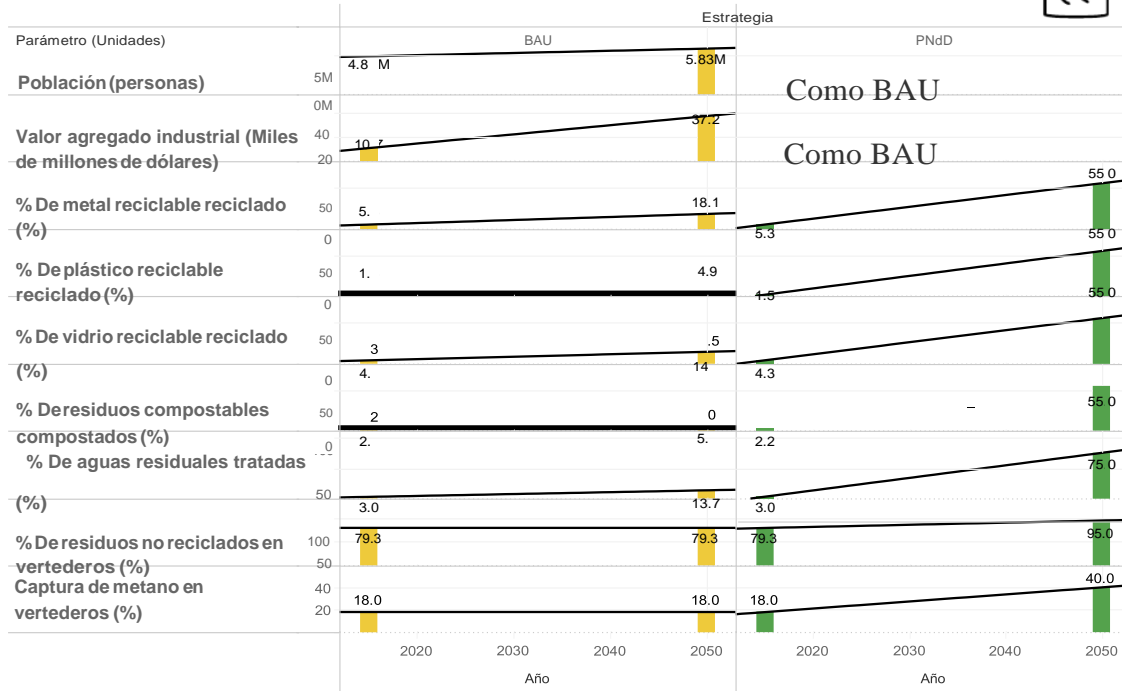
Proyección de las emisiones del sector de residuos

Se estima que las emisiones aumentarán en el escenario “sin descarbonización” debido al incremento proyectado de la población y la actividad industrial. Las reducciones de las emisiones como consecuencia del PNdD se producen por las siguientes intervenciones: mayor reciclaje y compostaje, un servicio de alcantarillado más centralizado y mayor tratamiento de las aguas residuales en las áreas urbanas, un saneamiento más seguro en las zonas rurales, mayor uso de vertederos para residuos no reciclados y mayor captura del metano en los vertederos. Los valores históricos correspondientes a los residuos líquidos y sólidos y a los factores de residuos per cápita se basan en lo escrito por Solera et al. (2015) y en estimaciones adicionales de referencia sobre reciclaje basadas en material de Canelo (2018) y Ben-Haddej et al. (2010). Los factores de corrección de metano para las aguas residuales y los residuos sólidos se tomaron de Solera et al. (2015) e IPCC (2019) Volumen 5, Capítulo 6. Los factores de emisiones netas para los materiales reciclados se obtuvieron de Turner, Williams y Kemp (2015).

El gráfico A.6 muestra los principales supuestos en que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD. Vaya al vínculo que se detalla en las notas del gráfico para ver las visualizaciones interactivas, donde se incluyen estimaciones de las emisiones y rangos para los valores de entrada.

Gráfico A.6. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de residuos

(7) Parámetros de Residuos



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”.

Cuantificación de los beneficios

Los beneficios de reducir los GEI en el sector de residuos incluyen aquellos que surgen por el menor costo social de las emisiones de GEI, los beneficios en cuestiones de salud y estéticas por reducir la polución causada por las aguas residuales no tratadas debido al uso y la combustión de combustibles fósiles, y el valor de los residuos sólidos reciclados y las aguas residuales tratadas.

Para estimar el beneficio de reciclar los residuos, suponemos un porcentaje de residuos recién reciclados que resulta valioso (actualmente, 50 por ciento) y, luego, lo multiplicamos por un factor de valor de incertidumbre. Las estimaciones por el valor de tratar las aguas residuales se basan en un estudio que analiza la voluntad de pago de los hogares en Uruguay (Dixon, 2012). El valor específico del agua reciclada se desconoce, por lo que consideramos un rango amplio de valores plausibles basados en el precio que se cobra en Costa Rica por el agua tratada.

Cuadro A.8. Factores de beneficio para el sector de residuos

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Valor del vidrio reciclado.	Valor del material compostado o reciclado.	[\$268, \$447 , \$626] por tonelada de material reciclado	Promedio imputado de Montero (2009), con un peso de botella supuesto de 190 g (Gyekye, 2014) y un rango de ±40%.
Valor del metal reciclado.	Valor del material compostado o reciclado.	[\$1.463, \$2.490 , \$3.517] por tonelada de material reciclado	Imputado según el valor del material de desecho exportado extraído de Lobo et al. (2016).
Valor del papel reciclado.	Valor del material compostado o reciclado.	[\$72, \$132 , \$193] por tonelada de material reciclado	
Valor del plástico reciclado.	Valor del material compostado o reciclado.	[\$452, \$489 , \$525] por tonelada de material reciclado	
Valor del servicio de alcantarillado para los residentes.	Valor de la conexión al servicio de alcantarillado por vivienda. Basado en un estudio que analiza la voluntad de pago de los hogares en Uruguay.	[\$150, \$270 , \$320] por año por vivienda	Valor del supuesto de referencia tomado de Dixon (2012). Rango según criterio del autor.
Valor de recolectar y tratar las aguas residuales para el medioambiente en lugar de la descarga informal.	Estimación de los beneficios ambientales para la comunidad de tener más viviendas conectadas al servicio de alcantarillado.	[\$10, \$29 , \$40] por año por vivienda	Valor del supuesto de referencia tomado de Dixon (2012). Rango según criterio del autor.
Valor del agua reciclada para otros usos (es decir, economía circular).	Valor de las aguas residuales tratadas.	[\$100, \$200 , \$300] por cada mil metros cúbicos	Estimación muy conservadora del valor potencial de las aguas residuales tratadas. Las tarifas minoristas asociadas con el agua tratada varían entre \$550 y \$2.130 por cada mil metros cúbicos para uso doméstico regular (Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos [ARESEP], 2020).

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el "supuesto de referencia" en negrita.

Estimaciones de costos

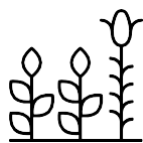
Los costos de reducir las emisiones de GEI en el sector de residuos se asocian principalmente con la recolección de los residuos, el aumento del reciclaje y el compostaje, un mayor tratamiento de las aguas residuales y la captura del metano de los vertederos. Suponemos un costo de reciclar los residuos equivalente al valor de los residuos reciclados estimados arriba para los supuestos de referencia. El análisis de la incertidumbre, entonces, explora la variabilidad en torno a esta estimación. El costo de reciclar los residuos se obtiene de la literatura pertinente.

Cuadro A.9. Factores de costo del sector de residuos

Costo	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuente
Costos de aumentar la recolección de los residuos.	Costo por unidad de aumentar la recolección de residuos.	[\$45, \$72 , \$100] por tonelada de residuos recolectados	“Banco Mundial: Costa Rica’s Waste Generation Expected to Double by 2025”, 2012.
Costos de aumentar el reciclaje y el compostaje como una fracción del valor.	Costos de reciclar y compostar como una fracción del valor.	[0,9; 1 ; 1,5]	El costo se toma como una fracción del valor calculado.
Costos de aumentar el tratamiento de las aguas residuales en las áreas urbanas.	Costos por unidad de aumentar el tratamiento en las áreas urbanas con servicio de alcantarillado.	[\$830, \$1.063, \$1.354] por vivienda	AyA, 2016. Los valores se imputaron de forma tal que los costos agregados no descontados equivalgan a los totales de la inversión indicados por el PNIS.
Costos de aumentar las conexiones urbanas al servicio de alcantarillado.	Costos por unidad de ampliar la red y conexiones del servicio de alcantarillado en las zonas urbanas.	[\$1.088, \$6.906, \$10.181] por vivienda	
Costos de aumentar el saneamiento seguro en las zonas rurales.	Costos por unidad de convertir las letrinas y otros tipos de tanques sépticos para las poblaciones rurales.	[\$172, \$366, \$503] por vivienda	
Costos de rehabilitar las redes de alcantarillado y las instalaciones de tratamiento existentes.	Costo agregado (a lo largo de 26 años: desde 2020 a 2045).	[\$2.055, \$2.569, \$3.083] millones	
Costo de aumentar la captura de metano en los vertederos.	Costo por tonelada de metano capturado en los vertederos.	[\$12, \$60 , \$91] por tonelada de metano	Límite inferior de Stege y Michelson, 2008. Límite superior de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), 2020.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el “supuesto de referencia” en negrita.

Sector de agricultura (eje 8)



El modelo del sector agrícola estima las emisiones de GEI asociadas a los procesos de la tierra y los cultivos (p. ej., las emisiones de la tierra, las emisiones netas de los cultivos, la aplicación de fertilizantes y la quema de residuos) y las entradas de energía no eléctrica, como el combustible utilizado por los equipos agrícolas. Las emisiones asociadas con el uso de la electricidad se reflejan en el sector de electricidad.

Las emisiones del sector agrícola están desagregadas según los siguientes cultivos principales:

- café
- frutas
- aceite de palma
- piña

- arroz
- caña de azúcar
- verduras
- bananos

y una categoría “otros” para incluir a todos los demás cultivos.

Se supone que las emisiones de los procesos relacionados con los cultivos son proporcionales al área de tierra utilizada para el cultivo y a los factores de emisión específicos del cultivo. Los factores de emisiones actuales se obtienen utilizando las estimaciones actuales relativas al uso de la tierra señaladas por Quirós-Tortós (2020) y a las específicas por cultivo del BUR. La plataforma IEEM informa sobre los cambios en el uso de la tierra en el futuro. Se calcula que las emisiones por uso de energía para las actividades agrícolas son proporcionales a la suma del valor agregado del cultivo y el ganado, lo cual está indicado en las proyecciones de la plataforma IEEM.

La principal ecuación para el modelo agrícola es la siguiente:

$$E_t = \sum_s (A_{s,t} \times F_{s,t})$$

donde:

- E = emisiones
- A = área por cultivo
- F = factor de emisión
- s = tipo de cultivo
- t = tiempo

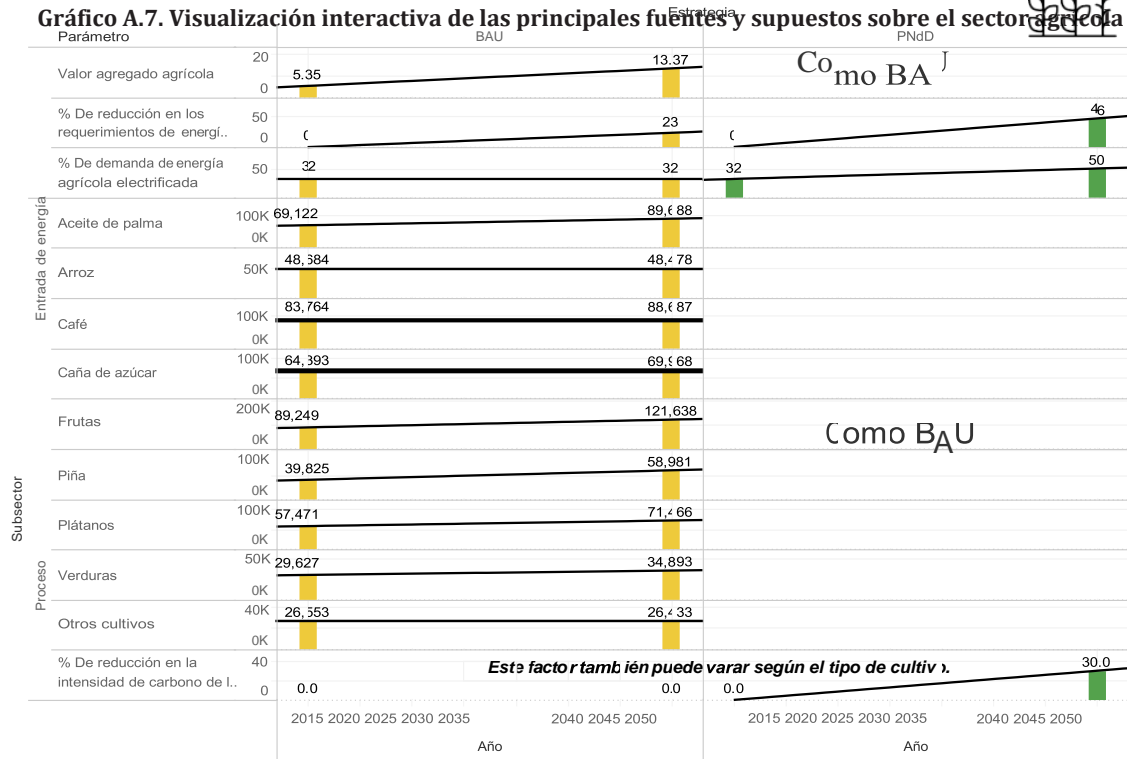
Proyección de las emisiones agrícolas

Se estima que las emisiones agrícolas aumentarán en el escenario “sin descarbonización” debido a los aumentos proyectados en la tierra utilizada para cultivos y la intensidad de la producción agrícola, lo cual se representa en el valor económico de la producción. Las reducciones de las emisiones como consecuencia del PNdD se producen por reducir las emisiones de GEI de los procesos de cultivo, plantar árboles y reducir la energía requerida por la producción agrícola. Estas reducciones se representan en el modelo mediante los cambios en las emisiones por área unitaria de cultivo (intensidad de las emisiones de carbono de la producción agrícola) y los cambios en los requisitos de energía por valor del cultivo.

El gráfico A.7 muestra los principales supuestos en que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD. Vaya al vínculo que se detalla en las notas del gráfico para ver las visualizaciones interactivas, donde se incluyen estimaciones de las emisiones y rangos para los valores de entrada.

(8) Parámetros de Agricultura

Gráfico A.7. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector agrícola



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”.

Cuantificación de los beneficios

Para todos los cultivos, combinamos el cambio en las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD y con un costo del factor de carbono derivado de la literatura pertinente. El valor nominal es \$0,608 por tonelada de CO₂e. Para cada cultivo, el modelo del sector estima el valor económico del cultivo y las emisiones correspondientes según si el proceso incluye la implementación del PNdD o no. La literatura pertinente sugiere que mejorar las prácticas para reducir las emisiones también puede aumentar los rendimientos y, por lo tanto, el valor económico. Para representar este beneficio, usamos un parámetro de incertidumbre que especifica la elasticidad del aumento del valor económico respecto de la reducción de las emisiones. Por ejemplo, un valor de 0,33 para este parámetro indica que, cada 10 por ciento de reducción de las emisiones de GEI, se obtiene un aumento del 3,3 por ciento del valor.

Cuadro A.10. Factores de beneficio para el sector agrícola

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Mayores rendimientos agrícolas gracias a prácticas mejoradas para reducir las emisiones	Aumento del valor de porcentaje como función del porcentaje de emisiones de GEI reducidas.	[10%, 33% , 45%] Ejemplo: El 33% indica que, por cada 10% de reducción de las emisiones de GEI, habría una mejora en el valor del orden del 3,3%.	Según criterio del autor, basado en Karlsson et al. (2020) y Verspecht et al. (2012).
Ahorros de costos al cambiar a electricidad de bajo costo.	Diferencia en los costos de la energía de fuentes eléctricas y no eléctricas.	Electricidad: (2018) \$0,14 por kWh; (2050, sin descarbonización) [\$0,06; \$0,08 ; \$0,12] por kWh; (2050, con el PNDD) [\$0,03; \$0,05 ; \$0,08] por kWh GLP: (2018) \$13,4 millones por PJ; (2050) [\$10,1; \$20,3 ; \$30,1] millones por PJ	Se utiliza la plataforma OSeMOSYS-CR para calcular los costos de la electricidad. Los precios de la energía de fuentes no eléctricas se representan mediante proyecciones de costos del propano y el butano extraídas de “Precios Históricos” de RECOPE (RECOPE, sin fecha).

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el “supuesto de referencia” en negrita.

Estimaciones de costos

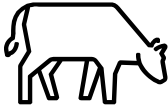
Estimamos los costos de las medidas de descarbonización del sector agrícola en función de los factores de costo específicos para los cafetales y todos los demás cultivos.

Cuadro A.11. Factores de costos para el sector agrícola

Costo	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuente
Costo de implementar los programas de reducción de las emisiones de GEI para los cafetales.	Costo de implementación del programa por cafetal.	[\$13 mil, \$22 mil , \$30 mil] por cafetal. Aplicado a 20 mil cafetales (cantidad aproximada en Costa Rica).	Acciones Nacionales de Mitigación Apropriadas (NAMA), Café de Costa Rica, sin fecha, p. 6 (costo total por nivel de productividad). Aumentado en alrededor de tres veces para obtener un valor conservador. Rango: criterio del autor.
Costo de los programas para reducir las emisiones de GEI para otros cultivos.	Costo de implementación de los programas por tonelada de emisiones de GEI reducidas.	[\$30, \$60 , \$100] por tonelada de CO ₂ e (Rango extraído de la fuente y ampliado por los autores).	Gillingham y Stock, 2018, p, 59, Cuadro 2.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el “supuesto de referencia” en negrita.

Sector de ganadería (eje 9)

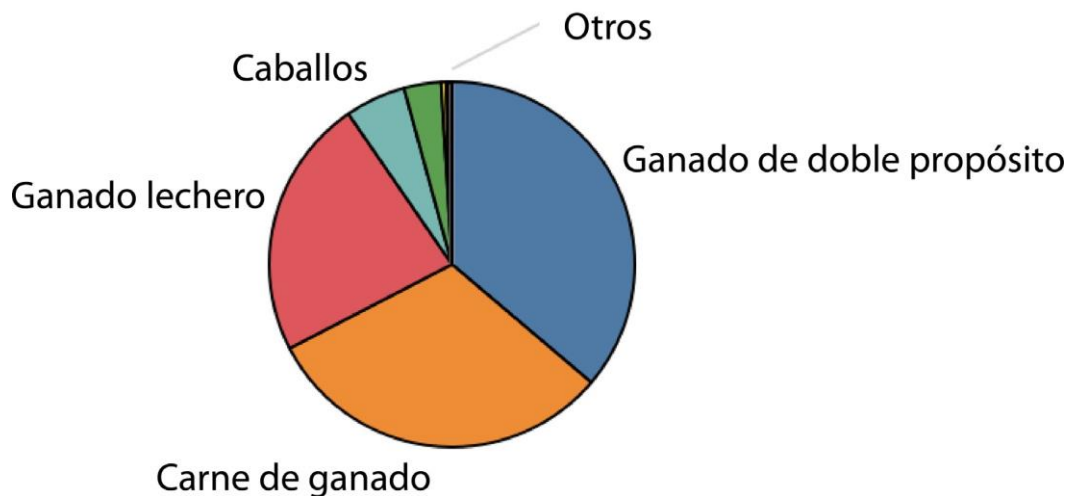


El modelo del sector de ganadería estima emisiones de GEI generadas por la cría de diez tipos principales de animales:

- ganado de carne
- ganado lechero
- ganado de doble propósito
- cabras
- caballos
- mulas
- cerdos
- aves
- ovejas
- búfalo de agua

Las emisiones de GEI para cada tipo de animal se basan en tasas de emisión por animal, las cuales se componen de factores de emisión separados para la fermentación entérica y la descomposición del estiércol. Tal como se muestra en el gráfico A.8, la gran mayoría de las emisiones actuales (año 2018) provienen del ganado vacuno y los caballos.

Gráfico A.8. Proporciones de las emisiones por tipo de animal, año 2018



Proyección de las emisiones ganaderas

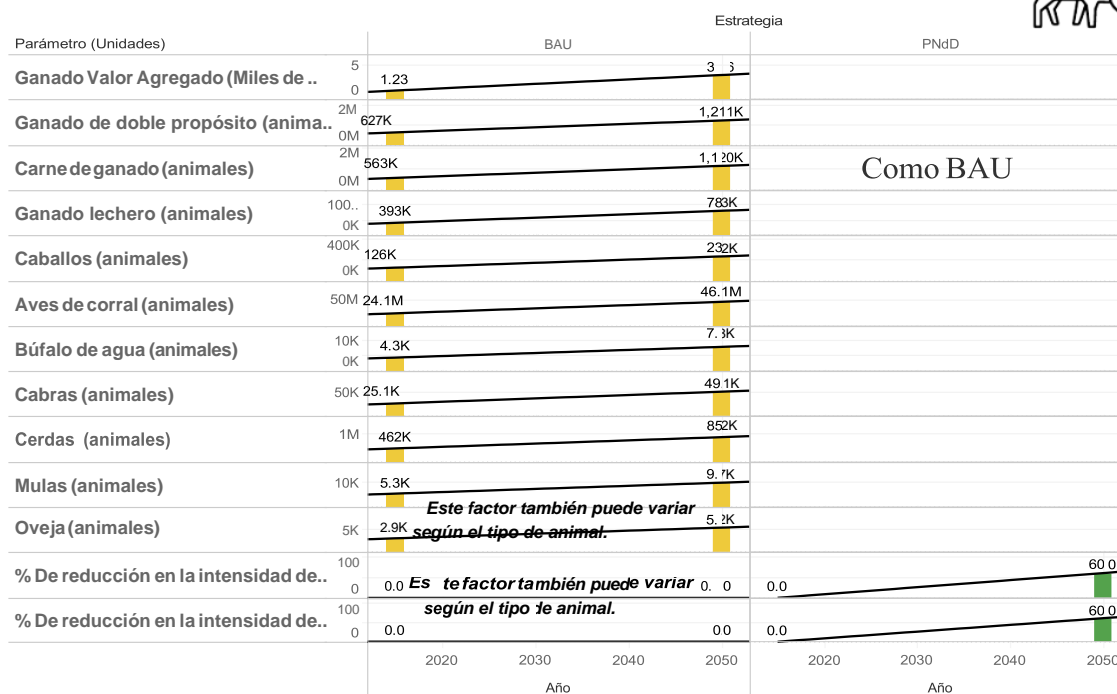
Se estima que las emisiones ganaderas aumentarán en el escenario “sin descarbonización” debido a que aumenta la cantidad de cabezas de ganado. Las proyecciones sobre este aumento se basan en las tasas de crecimiento estimadas por la plataforma IEEM para la cantidad de cabezas de ganado. Las reducciones de las emisiones como consecuencia del PNdD se producen por reducir las emisiones de

GEI relativas a la fermentación entérica y la gestión del estiércol. En el modelo, se representan mediante factores de reducción del porcentaje para las emisiones de GEI de la fermentación entérica y el estiércol.

El gráfico A.9 muestra los principales supuestos en que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD. La mayoría de las emisiones de GEI se deben al ganado vacuno, por lo que solo modelamos los valores correspondientes a estos animales. Vaya al vínculo que se detalla en las notas del gráfico para ver las visualizaciones interactivas, donde se incluyen estimaciones de las emisiones y rangos para los valores de entrada.

Gráfico A.9. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector ganadero

(9) Parámetros de Ganadería



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”.

Cuantificación de los beneficios

Los beneficios de descarbonizar el sector ganadero se relacionan con la reducción de los impactos climáticos en Costa Rica, representados por un factor costarricense de costo del carbono y con incrementar el valor de las tierras de pastura mediante el uso de mejores prácticas ganaderas, incluyendo la plantación de árboles. Específicamente, combinamos las estimaciones de cambios en las emisiones de GEI entre el escenario “sin descarbonización” y el escenario “con la implementación del PNdD” para una variedad de animales (vacas, cabras, caballos, mulas, ovejas y búfalos de agua), empleando un factor de beneficio derivado de la literatura pertinente.

Cuadro A.12. Factores de beneficio para el sector ganadero

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Valor de una mejor condición del suelo y la productividad por mejores prácticas ganaderas.	Mayor valor de la tierra de pastura por reducción de las emisiones de GEI.	[\$1; \$2,46 ; \$3,5] por tonelada de CO ₂ e	Henderson et al., 2017; Arango et al., 2020.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el “supuesto de referencia” en negrita.

Estimaciones de costos

El costo de reducir las emisiones de GEI en el sector ganadero se basa en un costo unitario estimado de reducir las emisiones en las tierras de pastura extraído de la literatura pertinente.

Cuadro A.13. Factores de costos para el sector ganadero

Costo	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuente
Costo de los programas para reducir las emisiones de GEI del ganado.	Costo de implementación de los programas por tonelada de emisiones de GEI reducidas. Incluye alternativas de alimentación y suplementos dietarios, implementación de programas para mejorar la eficiencia, reducir la carga animal y aumentar el control biológico.	[\$50, \$71, \$100] por tonelada de CO ₂ e	Gillingham y Stock, 2018, p. 59, Cuadro 2. Rango: criterio del autor.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el “supuesto de referencia” en negrita.

Sector de bosques y biodiversidad (eje 10)

Los bosques existentes (incluidos los manglares) capturan dióxido de carbono. La conversión de las tierras boscosas a otros tipos de tierras emite dióxido de carbono a la atmósfera. El modelo de soluciones basadas en la naturaleza estima las emisiones de GEI asociadas con estos dos componentes: (1) las emisiones relacionadas con la conversión de los bosques a otros tipos de tierra y (2) las emisiones netas (principalmente, la captura) por parte de los bosques existentes (incluidos los manglares).

Se utilizan factores de emisiones de GEI separados para representar la captura neta en las siguientes categorías de uso de la tierra:

- bosque primario y secundario de los siguientes tipos: húmedo, seco, de palmeras y manglares,
- pastizales,
- tierras de cultivo,
- humedales,
- asentamientos,
- otros.

La principal ecuación para el modelo de soluciones basadas en la naturaleza es la siguiente:

$$E_t = \sum_{s \in S} A_{st} X_{st} + \sum_{s \in S_c} \sum_{f \in S_f} A'_{fst} C_{fs}$$

tal que:

$$L = \sum_{s \in S} A_{st}$$

donde:

- E = emisiones [MtCO₂e]
- A = área por tipo de uso de la tierra s [hectáreas]
- A' = área de tipo boscosa f convertida por tipo de uso de la tierra s [hectáreas]
- C = factor de emisión para la conversión del bosque a otro tipo de uso de la tierra, s [MtCO₂e por hectárea]
- L = área total estimada; se supone que es de 5.113.939,5 ha (Quirós-Tortós, 2020) [hectáreas]
- X = factor de emisiones por cobertura existente (las tierras boscosas tienen un factor de emisión negativo) [MtCO₂e por hectárea]
- S = todos los tipos de uso de la tierra
- S_f = todos los tipos de uso de las tierras boscosas (S_f = {húmedo primario, húmedo secundario, seco primario, seco secundario, manglares primario, manglares secundario, palmeras primario, palmeras secundario})
- S_c = todos los tipos de uso de la tierra con factor de emisiones por conversión (S_c = {tierra de cultivo, pastizal})
- s = tipo de uso de la tierra
- t = tiempo

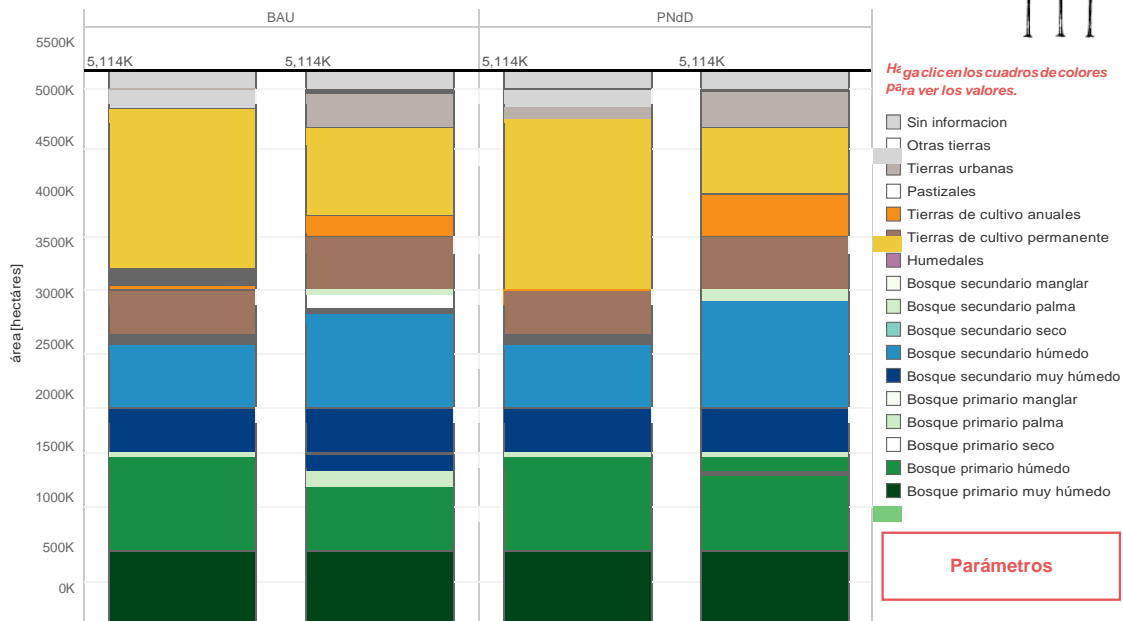
Las emisiones de conversión se calculan por pasar de las clases de tierras boscosas a tierras de cultivo o pastizales. Las estimaciones de emisiones existentes para las tierras de cultivo se consideran en el sector agrícola.

El uso proyectado de la tierra para los casos “sin descarbonización” se derivan de la matriz de probabilidades de transición desarrollada por Quirós-Tortós (2020). Comenzamos por calcular los patrones de cambio desde 2010 hasta 2015 y aplicamos esos cambios hasta el año 2050. Hicimos algunos ajustes menores para que el cambio en las tierras agrícolas fuese congruente con las proyecciones de la plataforma IEEM. Para los escenarios con implementación del PNdD, redujimos la cantidad de deforestación de bosques primarios desde las tasas actuales hasta cero en el 2050. También podrían explorarse otras opciones para aumentar el área boscosa, incluido aumentar los bosques secundarios más de lo que se proyecta que aumentarán en las condiciones “sin descarbonización”. Cabe mencionar que plantar árboles en áreas agrícolas (por ejemplo, en los cafetales) es una estrategia para reducir las emisiones netas en el sector agrícola. Las tierras agrícolas con mayor cantidad de árboles igualmente

se clasifican como agrícolas en este estudio. El gráfico A.10 muestra el área correspondiente a cada clase de tierra para 2015 y 2050, bajo las condiciones “sin descarbonización” y “con la implementación del PNdD”. Vaya al vínculo que se detalla en las notas del gráfico para acceder a esta visualización interactiva.

Gráfico A.10. Visualización interactiva de los cambios proyectados en el uso de la tierra desde 2015 hasta 2050, bajo las condiciones sin descarbonización y con el PNdD

(10) Cambios en el uso del suelo



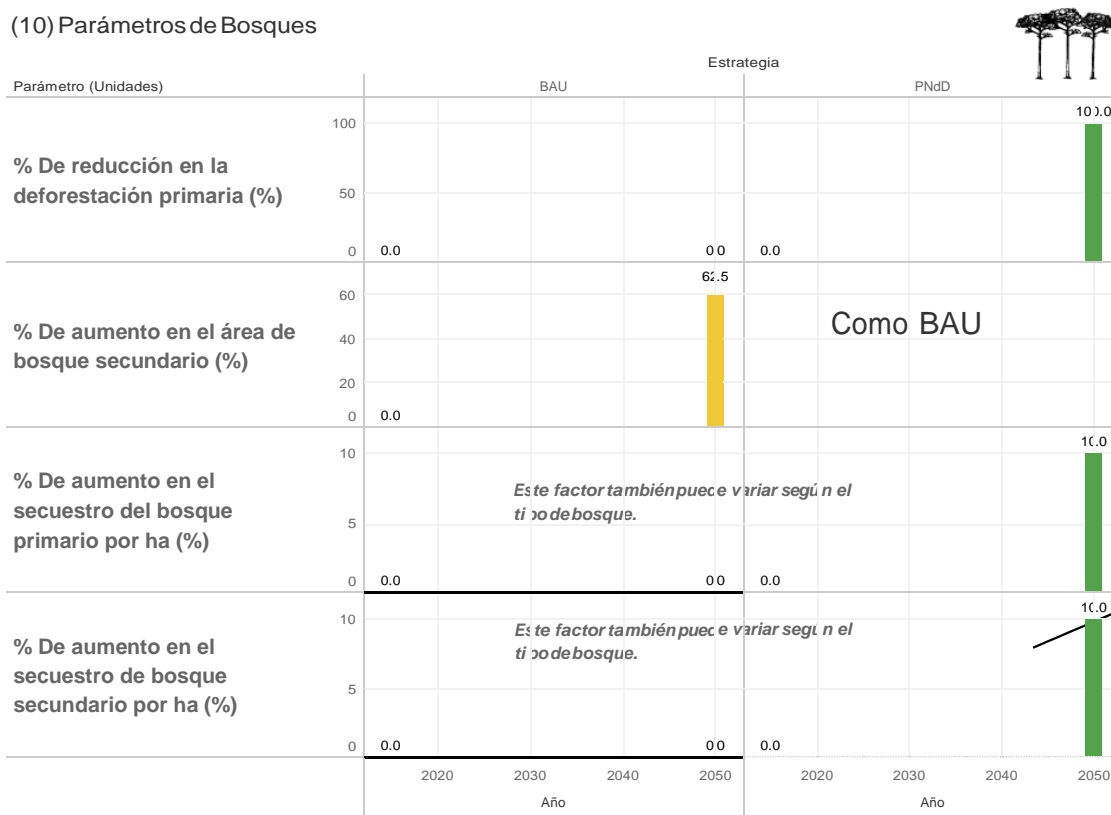
NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”.

Proyección de las emisiones netas del sector de bosques y biodiversidad

Se estima que las emisiones netas por el uso de la tierra serán cada vez más negativas en el escenario “sin descarbonización” debido a que se espera una continua reducción en las tasas de deforestación. Con la implementación del PNdD, las proyecciones indican que las emisiones netas serán aún más negativas, dado que se reduce la deforestación del bosque primario y se hacen inversiones para aumentar el potencial de captura de GEI de los bosques existentes.

El gráfico A.11 muestra los principales supuestos en que se basan las estimaciones de las emisiones de GEI con y sin la implementación del PNdD. Vaya al vínculo que se detalla en las notas del gráfico para ver las visualizaciones interactivas, donde se incluyen estimaciones de las emisiones y rangos para los valores de entrada.

Gráfico A.11. Visualización interactiva de las principales fuentes y supuestos sobre el sector de bosques y biodiversidad



NOTAS: Esta es una captura de pantalla de “Evaluación de los costos y beneficios de la descarbonización en Costa Rica”, 2020. Vaya a https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR633-1/visualization.html para acceder a esta herramienta interactiva. “BAU” indica la estimación “sin descarbonización”. “PNdD” se refiere a la estimación “con la implementación del PNdD”.

Cuantificación de los beneficios

Se asocian diferentes beneficios con el aumento de la captura neta mediante la mejora y la ampliación de los bosques. Para este estudio, cuantificamos los beneficios relativos a reducir el costo social de las emisiones de carbono, aumentar el valor de la biodiversidad y la resiliencia climatológica. Para todos los sectores, combinamos el cambio en las emisiones de GEI con y sin un costo del factor de carbono derivado de la literatura pertinente. El valor nominal es \$0,608 por tonelada de CO₂e.

Una evaluación detallada de los valores correspondientes a los servicios ecosistémicos de los bosques y manglares de Costa Rica proporciona estimaciones sobre los beneficios por área y por año de los servicios ecosistémicos (Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF, 2017). Los beneficios incluyen aquellos relacionados con lo siguiente:

- servicios (energía hidroeléctrica, alimentos, material genético, medicamentos, madera, leña y carbón, forraje, otras materias primas y agua dulce),
- reglamentaciones (agua y caudal, calidad del agua, control biológico, clima, erosión, resiliencia, polinización),

- culturales (turismo y recursos culturales) y
- servicios adicionales (protección de la biodiversidad, incubación, fertilidad del suelo).

Para los beneficios generados por la conservación del área boscosa como parte de la implementación del PNdD, combinamos los cambios en los bosques húmedos, secos y de manglares con y sin la implementación del PNdD, aplicando los factores de beneficios por los servicios ecosistémicos, para estimar los beneficios en servicios ecosistémicos específicos del PNdD.

Puede haber otros beneficios ecosistémicos generados por las inversiones para aumentar la captura de los bosques existentes. Para estimar este beneficio que entraña gran incertidumbre, utilizamos un factor de elasticidad aplicable al beneficio. Por cada aumento de porcentaje en la captura, suponemos un aumento proporcional en los servicios ecosistémicos. Por ejemplo, un valor de factor de 0,33 indicaría que un aumento del 15 por ciento en la tasa de captura generaría un incremento del 5 por ciento en los servicios ecosistémicos.

Cuadro A.14. Factores de beneficio para el sector de bosques y biodiversidad

Beneficio	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuentes
Menores impactos del cambio climático causado por las emisiones (reducción del costo social del carbono).	Costo social de las emisiones de GEI estimado para Costa Rica.	[\$0,36; \$0,61 ; \$1,04] por tonelada de CO ₂ e	Ricke et al., 2018a, 2018b.
Valor de mejores servicios ecosistémicos debido a la conservación de los bosques.	Estimaciones del valor de los servicios ecosistémicos por tipo de bosque.	Bosque húmedo primario: [\$15 mil, \$25 mil, \$30 mil] por hectárea por año Bosque seco primario: [\$30, \$49, \$60] por hectárea por año Bosque de manglares primario: [\$10 mil, \$25 mil, \$30 mil] por hectárea por año Bosques secundarios: 50% del primario (según criterio del autor)	Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF, 2017: Bosque/selva tropical (cuadro 4.1), bosque seco (cuadro 4.2), manglares (cuadro 4.3).
Valor de mejores servicios ecosistémicos debido a una mejor gestión.	Estimación del aumento relativo en el valor de los servicios ecosistémicos (según los parámetros definidos arriba) por aumento del porcentaje en la captura de CO ₂ .	[0, 33%, 50%] Ejemplo: Un 33% indica que por cada 10% de aumento en la captura, los servicios ecosistémicos aumentarían un 3,3%.	Según criterio del autor.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el "supuesto de referencia" en negrita.

Estimaciones de costos

Estimamos los costos de oportunidad de reducir la deforestación y el costo por aumentar la captura de carbono neta de los bosques existentes

Consideramos el valor de la madera no cosechada, la pérdida de valor potencial de la agricultura y de la cría de ganado. Suponemos un valor unitario simple para la madera tomado de anuncios recientes de ventas de terrenos. Un enfoque alternativo que implica utilizar el valor de los pagos para servidumbres de conservación reduciría significativamente los costos (Porras et al., 2013). El costo de oportunidad de no cultivar la tierra se deriva de forma endógena del modelo; se emplea la diferencia en el área de tierra para cultivos y pastizales y el valor de la agricultura y el pastoreo. Se supone un factor de elasticidad simple para estimar la proporción de pastizales que se habrían utilizado para pastoreo.

Cuadro A.15. Factores de costos para el sector de bosques y biodiversidad

Costo	Factor	Rango del supuesto de referencia	Fuente
Valor de la madera no cosechada	Valor de la madera (\$ por hectárea)	[\$16 mil, \$21.100 , \$33 mil] por hectárea	Estimado aproximado basado en la revisión de las ventas de tierras por parte de los autores. La estimación es conservadora al establecer que los costos serían significativamente menores si se utilizase el valor de las servidumbres de conservación de las zonas boscosas: entre \$640 y \$800 por hectárea (empleando valores del año 2013) (Porras et al., 2013).
Costo de oportunidad por la agricultura perdida.	Cálculo endógeno basado en las diferencias en las áreas de tierras agrícolas entre los escenarios con implementación del PNdD y "sin descarbonización", y el valor de la agricultura.		
Costo de oportunidad por la ganadería perdida.	Cálculo endógeno basado en las diferencias de ganadería entre los escenarios con implementación del PNdD y "sin descarbonización" multiplicado por un factor de elasticidad y el valor de la ganadería.	[25%, 50% , 75%] Ejemplo: Un 50% indica que la reducción de un acre de pastizales para conservar el bosque con la implementación del PNdD indicaría ganadería	Según criterio del autor.
Costo por aumentar la captura de carbono neta de los bosques existentes.	Costo unitario de aumentar la captura.	[\$50, \$80 , \$120] por tonelada de CO ₂ e Rango extraído de la literatura pertinente y ampliado por los autores.	Busch et al., 2019.

NOTA: Los rangos se indican entre corchetes, con el "supuesto de referencia" en negrita.

Referencias del Apéndice A

- Arango, Jacobo, Alejandro Ruden, Deissy Martinez-Baron, Ana María Loboguerrero, Alexandre Berndt, Mauricio Chacón, Carlos Felipe Torres, Walter Oyhantcabal, Carlos A. Gomez, Patricia Ricci, Juan Ku-Vera, Stefan Burkart, Jon M. Moorby y Ngonidzashe Chirinda: “Ambition Meets Reality: Achieving GHG Emission Reduction Targets in the Livestock Sector of Latin America”, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 14 de mayo de 2020. Al 18 de octubre de 2020: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.00065/full>
- Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), “Tarifa Acueducto ESPH, 2020”, 2020. Al 13 de octubre de 2020: https://aresep.go.cr/agua-potable/index.php?option=com_content&view=article&id=289_2&catid=58
- AyA (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados): *Plan Nacional de Inversiones en Saneamiento, 2016–2045*, San José, Costa Rica, 2016. Al 8 de octubre de 2020: <https://www.aya.go.cr/ASADAS/Documents/PLAN%20NACIONAL%20DE%20INVERSIONES%20EN%20SANEAMIENTO%202016-2045.pdf>
- Ben-Haddej, D., A. Buchenan, A. Owen y G. Shakan: *Managing Costa Rica’s Waste: Recommendations for a Municipal Solid Waste Management Plan*, Worcester, Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2010.
- Busch, Jonah, Jens Engelmann, Susan C. Cook-Patton, Bronson W. Griscom, Timm Kroeger, Hugh Possingham y Priya Shyamsundar: “Potential for Low-Cost Carbon Dioxide Removal Through Tropical Reforestation”, *Nature Climate Change*, Vol. 9, 2019, pp. 463–466.
- Canelo, Abelardo: “Costa Rica Recycles Only 6.6% of Its Daily Residues”, *Costa Rica News*, 17 de mayo de 2018. Al 8 de octubre de 2020: <https://thecostaricanews.com/costa-rica-recycles-only-6-6-of-its-daily-residues/>
- Coady, David, Ian Parry, Nghia-Piotr Le y Baoping Shang: “Global Fossil Fuel Subsidies Remain Large: An Update Based on Country-Level Estimates”, Papeles de trabajo del Fondo Monetario Internacional, Departamento de Asuntos Fiscales, mayo de 2019.
- COSEVI: *Anuario estadístico de accidentes de tránsito con víctimas en Costa Rica*, Informe técnico, Consejo de Seguridad Vial, 2017.
- DecisionWare Group LLC, *Costa Rica—Assessing Climate Mitigation Pathways to Support NDC Implementation: Final Report—Assessment of Mitigation Measure to Achieve NDC Goals*, octubre de 2017.
- Dixon, John A.: *Enhanced Cost Benefit Analysis of IDB Waste Water Treatment Projects with Special Consideration to Environmental Impacts: Lessons Learned from a Review of Four Projects*, Discussion Paper N.º IDB-DP-254, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2012.

- Electric Power and Energy Research Laboratory (EPERLab): “The OSeMOSYS–CR Model”, GitHub, 2020. Al 7 de octubre de 2020:
<https://osemosys-cr.readthedocs.io/en/latest/>
- EPERLab: *Ver* Laboratorio de Investigación en Potencia y Energía.
- Fischedick, Manfred, Joyashree Roy, Amr Abdel-Aziz, Adolf Acquaye, Julian Allwood, Jean-Paul Ceron, Yong Geng, Haroon Kheshgi, Alessandro Lanza, Daniel Perczyk, Lynn K. Price, Estela Santalla, Claudia Sheinbaum, Kanako Tanaka, Roland Clift y Valentin Nenov: “Chapter 10: Industry”, en Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Jan C. Minx, Ellie Farahani, Susanne Kadner, Kristin Seyboth, Anna Adler, Ina Baum, Steffen Brunner, Patrick Eickemeier, Benjamin Kriemann, Jussi Savolainen, Steffen Schlömer, Christoph von Stechow y Timm Zwickel, eds.: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press, 2014.
- Gallardo, Fernando Luis Victor: *Contaminantes climáticos de corta duración en Costa Rica*. informe preparado para la Coalición Clima y Aire Limpio, Ministerio de Ambiente y Energía (Costa Rica), Dirección de Cambio Climático, 2018.
- Gillingham, Kenneth y James H. Stock: “The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions”, *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 32, N.º 4, otoño de 2018, pp. 53–72.
- Gyekye, Liz: “Coca-Cola Lightweights 330ml Glass Bottle”, edie News, 18 de febrero de 2014. Al 8 de octubre de 2020:
<https://www.edie.net/news/5/Coca-Cola-lightweights-330ml-glass-bottle/>
- Haro, Tapia, Daniel Ivan, Gaëtan Hinojosa, Anca Madalina Purcel, Cindy Cruz Barahona, José Pablo Murillo Corrales y Silvia Fonseca Blanco: *30 Medidas analizadas del Plan Nacional de Descarbonización (PND) 2018–2050 de Costa Rica: Análisis y estimación de costos, procesos y necesidades de los ejes 1, 2 y 3 del PND*, 2019.
- Henderson, B., A. Falcucci, A. Mottet, L. Early, B. Werner, H. Steinfeld y P. Gerber: “Marginal Costs of Abating Greenhouse Gases in the Global Ruminant Livestock Sector”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 22, 2017, pp. 199–224.
- ICE: *Ver* Instituto Costarricense de Electricidad.
- Institute for Electric Efficiency: *The Costs and Benefits of Smart Meters for Residential Customers*, Informe técnico del IEE, julio de 2011. Al 8 de octubre de 2020:
https://www.edisonfoundation.net/-/media/Files/IEI/publications/IEE_BenefitsofSmartMeters_Final.ash
- Instituto Costarricense de Electricidad: *Plan de expansión de la transmisión 2017–2027*, 2017. Al 8 de octubre de 2020:
<https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/32e304c0-bff9-4436-ace0-33e13a85d3da/Plan+de+Expansi%C3%B3n+de+la+Transmisi%C3%B3n+2017-2027.pdf?MOD=AJPERES&CVID=m1s2MEe>

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, 2006. Al 7 de octubre de 2020: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: *Perfeccionamiento de 2019 de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, 2019. Al 8 de octubre de 2020: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Agencia Internacional de las Energías Renovables: *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, Abu Dhabi, 2017.
- Agencia Internacional de las Energías Renovables: *Renewable Power Generation Costs in 2018*, Agencia, Abu Dhabi, 2019.
- IPCC: *Ver* Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IRENA: *Ver* Agencia Internacional de las Energías Renovables.
- Karlsson, Mikael, Eva Alfredsson y Nils Westling: “Climate Policy Co-Benefits: A Review”, *Climate Policy*, Vol. 20, 2020, pp. 292–316.
- Lobo, Susy, Maritza Marin, Victoria Rudin y Fiorella Salas: *Analysis of the Challenges in the Development of the Recycling Value Chain in Central America*, IDB Monograph 485, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2016. Al 8 de octubre de 2020: <https://publications.iadb.org/en/analysis-challenges-development-recycling-value-chain-central-america>
- McKinsey & Company: *Impact of the Financial Crisis on Carbon Economics: Version 2.1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*, 2010. Al 8 de octubre de 2020: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Impact%20of%20the%20financial%20crisis%20on%20carbon%20economics%20Version%2021/Impact%20of%20the%20financial%20crisis%20on%20carbon%20economics%20Version%2021.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos y Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica: *Plan Integral de Movilidad Urbana Sostenible para el Área Metropolitana de San José, Costa Rica*, Informe técnico de 2017. Al 8 de octubre de 2020: https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/09/PIMUS_INFORME-EJECUTIVO.pdf
- Montero, Xinia Hernández: “Centros de Acopio de Material Reciclable”, Universidad Nacional Costa Rica, 2009. Al 8 de octubre de 2020: <http://www.documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/3659/CENTROS%20DE%20ACOPIO%20DE%20MATERIAL%20RECICLABLE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Acciones Nacionales de Mitigación Apropriadas, Café de Costa Rica: *NAMA Facility Administración de Finca*, sin fecha. Al 8 de octubre de 2020:
https://www.namacafe.org/sites/default/files/content/bloque3_administracion_de_finca.pdf
- Porras, Ina, David N. Barton, Adriana Chacón-Cascante y Miriam Miranda: *Learning from 20 Years of Payments for Ecosystem Services in Costa Rica*, International Institute for Environment and Development, London, noviembre de 2013.
- Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF: *Valoración de los servicios ecosistémicos que ofrecen siete de los humedales protegidos de importancia internacional en Costa Rica: Palo Verde, Caribe Noreste, Caño Negro, Gandoca-Manzanillo, Maquenque, Terraba Sierpe y Las Baulas, San José, Costa Rica*, SINAC/CINPE-UNA/PNUD, 2017.
- Ricke, Katharine, Laurent Drouet, Ken Caldeira y Massimo Tavoni: “Country-Level Social Cost of Carbon”, *Nature Climate Change*, Vol. 8, 2018a, pp. 895–900.
- Ricke, Katharine, Laurent Drouet, Ken Caldeira y Massimo Tavoni: “Country-Level Social Cost of Carbon: Database Explorer”, página de GitHub, 2018b. Al 8 de octubre de 2020:
<https://country-level-scc.github.io/explorer/>
- Rissman, Jeffrey, Chris Bataille, Eric Masanet, Nate Aden, William R. Morrow III, Nan Zhou, Neal Elliott, Rebecca Dell, Niko Heeren, Brigitta Huckestein, et al.: “Technologies and Policies to Decarbonize Global Industry: Review and Assessment of Mitigation Drivers Through 2070”, *Applied Energy*, Vol. 266, 2020, p. 114848.
- Quirós-Tortós, Jairo Humberto: “Development and Assessment of Decarbonization Pathways to Inform Dialogue with Costa Rica Regarding the Updating Process of Nationally Determined Contribution (NDC)”, Banco Mundial, 2020.
- RECOPE (Refinadora Costarricense De Petróleo), “Precios Históricos”, sin fecha. Al 8 de octubre de 2020:
<https://www.recope.go.cr/productos/precios-nacionales/historicos/>
- Solera, Juan, Debbie Pierce, R. Espinosa, C. Julio, F. Chacón, Luis Roberto y Federico Alice: *Proyecciones Nacionales de Costa Rica: Línea base de emisiones de gases de efecto invernadero hasta el año 2030*, SCS Global Services, 2015.
- Steger, Alex y Jim Michelsen: *Pre-Feasibility Study for Landfill Gas Recovery and Utilization at the Loma de Los Cocos Landfill Cartagena de Indias, Colombia*, preparado para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Landfill Methane Outreach Program, 2008. Al 8 de octubre de 2020:
https://www.globalmethane.org/Data/148_LosCocos.Pre-Feasibility.Report.Final.English.pdf
- Talaei, Alireza, David Pier, Aishwarya V. Iyer, Md Ahiduzzaman y Amit Kumar: “Assessment of Long-Term Energy Efficiency Improvement and Greenhouse Gas Emissions Mitigation Options for the Cement Industry”, *Energy*, Vol. 170, 2019, pp. 1051–1066.

- Turner, David A., Ian D. Williams y Simon Kemp: “Greenhouse Gas Emission Factors for Recycling of Source-Segregated Waste Materials”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 105, Parte A, diciembre de 2105, pp. 186–197.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONU DI): *Energy Efficiency Potentials in Industrial Steam Systems in China: Development of a Steam Systems Energy Efficiency Cost Curve*, 2014. Al 8 de octubre de 2020:
https://www.unido.org/sites/default/files/2015-09/EE_Potentials_Steam_Systems_China_0.pdf
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Landfill Methane Outreach Program, *LFG Project Development Handbook*, marzo de 2020. Al 8 de octubre de 2020:
https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf
- Servicio Geológico de Estados Unidos: “National Minerals Information Center: Latin America and Canada | North America, Central America, and the Caribbean”, sin fecha. Al 8 de octubre de 2020:
<https://www.usgs.gov/centers/nmic/latin-america-and-canada-north-america-central-america-and-caribbean#cs>
- Verspecht, Ann, Valerie Vandermeulen, Erik Ter Avest, et al.: “Review of Trade-offs and Co-Benefits from Greenhouse Gas Mitigation Measures in Agricultural Production”, *Journal of Integrative Environmental Sciences* Vol. 9, Suplemento 1, 2012, pp. 147–157.
- Wang, Yun, Xiaohua Sun, Baocai Wang y Xiaoling Liu: “Energy Saving, GHG Abatement and Industrial Growth in OECD Countries: A Green Productivity Approach”, *Energy*, Vol. 194, 2020.
- Banco Mundial: “Datos de libre acceso del Banco Mundial”, 2020. Al 8 de octubre de 2020:
<https://data.worldbank.org>
- “Banco Mundial: Costa Rica’s Waste Generation Expected to Double by 2025”, *Inside Costa Rica*, 7 de junio de 2012. Al 8 de octubre de 2020:
<https://www.insidecostarica.com/dailynews/2012/june/07/costarica120060706.htm>

Apéndice B: Desarrollo de escenarios socioeconómicos

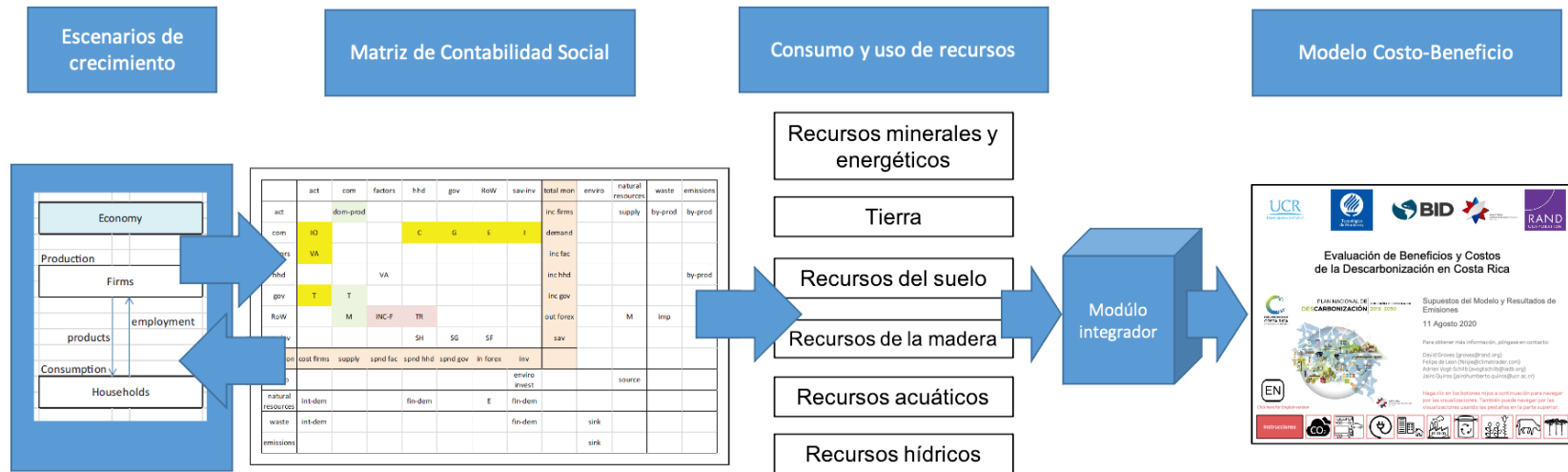
La Plataforma de Modelación Económico-Ambiental Integrada (Integrated Economic-Environmental Modeling [IEEM]) es un marco de trabajo de equilibrio general computable que permite analizar el impacto de las políticas públicas y las inversiones sobre indicadores tales como el PIB, el ingreso y el empleo, pero también sobre la riqueza y el capital natural (Banerjee et al., 2016). Para este estudio, utilizamos el marco de trabajo del modelo IEEM para generar un conjunto de escenarios de crecimiento para la economía costarricense que luego integramos en la arquitectura de modelado del estudio sobre costos y beneficios del PNdD. Esta integración permite comprender mejor cómo las diferentes vías de crecimiento afectan la relación costos-beneficios del PNdD en los diez ejes de acción propuestos.

El gráfico B.1 describe en forma de esquema el enfoque empleado para integrar ambos modelos. Cada uno de los bloques representa un componente de la plataforma IEEM y la información propuesta fluye entre los diferentes modelos. Los primeros dos bloques se refieren a la matriz de contabilidad social y los parámetros de calibración de IEEM utilizados para generar las líneas de crecimiento a largo plazo (es decir, 2 por ciento, 3,5 por ciento, 4 por ciento). El tercer bloque agrega los resultados de cada trayectoria de crecimiento simulada en los sectores que reflejan los diez ejes de acción del PNdD. Por último, el cuarto módulo es integrador y traduce los resultados de la plataforma IEEM bajo cada una de las trayectorias de crecimiento en entradas para el modelo de costos-beneficios del PNdD.

Referencias del Apéndice B

Banerjee, Onil, Martin Cicowiez, Mark Horridge y Renato Vargas: “A Conceptual Framework for Integrated Economic–Environmental Modeling”, *Journal of Environment and Development*, Vol. 25, No. 3, 2016, pp. 276–305

Gráfico B.1. Esquema de la integración de la plataforma IEEM y el modelo de emisiones de Costa Rica



Apéndice C: Detalles del análisis de vulnerabilidades del transporte

Análisis del sector de transporte

Para este análisis, clasificamos los resultados de la simulación en dos grupos de riesgo: (1) casos con emisiones altas y (2) casos con beneficios netos bajos. Luego, implementamos algoritmos de descubrimiento de escenarios que analizan la base de datos de simulaciones para brindar una descripción concisa de las condiciones de incertidumbre que generan estos riesgos. Para el descubrimiento de escenarios, utilizamos tres medidas estadísticas para describir la adecuación de un grupo relevante para las decisiones. Cobertura es el porcentaje del total de futuros vulnerables representados en el grupo. Densidad es el porcentaje de futuros del grupo que son vulnerables. Interpretabilidad es la facilidad con la cual las condiciones de incertidumbre que definen el grupo se puede comunicar a los públicos relevantes para la formulación de políticas (p. ej., tomadores de decisiones, otras partes interesadas). Por lo general, cuantas menos dimensiones utiliza el grupo, más sencilla resulta su interpretación. Para implementar el descubrimiento de escenarios, combinamos dos algoritmos. Primero, usamos el algoritmo de clasificación C5.0 para reducción de la dimensionalidad (Quinlan, 1993; Hornik et al., 2007). Se trata de un algoritmo recursivo que divide los datos para construir un modelo en forma de estructura de árbol. Segundo, usamos el algoritmo PRIM (Método de inducción llamado “Patient Rule Induction”) (Friedman y Fisher, 1999). Este es un algoritmo no paramétrico de clasificación que emplea la técnica “bump hunting”. Lo utilizamos para describir cuantitativamente las condiciones de vulnerabilidad del PNdD. En particular, utilizamos el PRIM en el contexto del método de descubrimiento de escenarios desarrollado por Bryant y Lempert (2010).

Riesgo de emisiones altas en el sector de transporte

Primero, utilizamos el descubrimiento de escenarios para entender los posibles futuros con altas emisiones. Son futuros en los que las emisiones del transporte están por encima de las 0,57 MtCO₂e. El cuadro C.1 resume los resultados. Cada fila describe uno de los escenarios identificados. Para cada condición de vulnerabilidad, brindamos una descripción detallada de las condiciones de frontera, así como las estadísticas correspondientes de cobertura y densidad que describen hasta qué punto estos escenarios representan adecuadamente las condiciones de vulnerabilidad de este objetivo.

Los resultados que se presentan en el cuadro C.1 muestran un patrón de variación relevante para la formulación de políticas en cuanto a los aspectos económicos de los diferentes escenarios. Encontramos

tres condiciones de vulnerabilidad. La primera, “Baja adopción de vehículos de combustibles alternativos” describe el 40 por ciento de los casos de vulnerabilidad relacionados con altas emisiones de GEI. Dos impulsores predicen el 73 por ciento de los casos vulnerables: la proporción de transporte privado eléctrico en el 2050 y la proporción de vehículos de hidrógeno en el transporte público. La segunda vulnerabilidad: “Vehículos convencionales económicos y eficientes en un escenario de gran crecimiento económico”, describe otro 20 por ciento de los casos vulnerables. La tasa de crecimiento económico, la relación de costo entre los vehículos eléctricos e híbridos y los vehículos convencionales, y la eficiencia en el consumo de combustible de los vehículos convencionales predicen el 72 por ciento de los casos vulnerables correspondientes a esta condición. La tercera vulnerabilidad: “Baja electrificación del transporte privado y de carga con crecimiento económico moderado”, explica otro 16 por ciento de los casos vulnerables. Los tres impulsores correspondientes a la Vulnerabilidad 2, en combinación con la proporción de transporte de carga ligera eléctrico en el 2050, predicen el 61 por ciento de los casos vulnerables.

Cuadro C.1. Análisis del descubrimiento de escenarios para el riesgo de emisiones altas en el sector de transporte

Escenario económico	Impulsores de la vulnerabilidad	Densidad	Cobertura
Vulnerabilidad 1: “Baja adopción de vehículos de combustibles alternativos”	<ul style="list-style-type: none"> • Proporción de transporte privado eléctrico para el año 2050 < 90% • Proporción del transporte público eléctrico y de hidrógeno < 82%. 	73%	40%
Vulnerabilidad 2: “Vehículos convencionales económicos y eficientes en un escenario de gran crecimiento económico”	<ul style="list-style-type: none"> • Escenario de alto crecimiento • Relación de costo entre los vehículos eléctricos e híbridos y los vehículos de combustibles convencionales > 101% • Uso eficiente del combustible en los vehículos a diésel, gasolina y GLP > 60% 	72%	20%
Reducción en los costos médicos por accidente.	<ul style="list-style-type: none"> • Escenario de crecimiento base • Relación de costo entre los vehículos eléctricos e híbridos y los vehículos de combustibles convencionales > 98% • Proporción del transporte de carga ligera eléctrico < 92% 	61%	16%

Riesgo de beneficios netos bajos por la descarbonización del sector de transporte

Luego, utilizamos el descubrimiento de escenarios para entender los posibles futuros con beneficios netos bajos. Estos son casos en que los beneficios netos son relativamente bajos en comparación con lo que podría ocurrir según los supuestos de referencia. Establecemos los umbrales como beneficios netos inferiores a \$13.100 millones (el primer cuartil en la distribución de los beneficios netos). El cuadro C.2 resume los resultados. Cada fila describe uno de los escenarios identificados. Para cada condición de vulnerabilidad, brindamos una descripción detallada de las condiciones de frontera, así como las estadísticas correspondientes de cobertura y densidad que describen hasta qué punto estos escenarios representan adecuadamente las condiciones de vulnerabilidad de este objetivo. Identificamos dos condiciones de vulnerabilidad: Vulnerabilidad 1: “Alto costo de los vehículos alternativos en condiciones de crecimiento económico bajo” y Vulnerabilidad 2: “Escaso uso del transporte público, alta demanda del transporte de carga y vehículos eléctricos costosos”.

Cuadro C.2. Resultados del descubrimiento de escenarios en relación con el riesgo de beneficios netos bajos por la descarbonización del sector de transporte

Escenarios	Impulsores de la vulnerabilidad	Densidad	Cobertura
Vulnerabilidad 1: “Alto costo de los vehículos alternativos en condiciones de crecimiento económico bajo”	<ul style="list-style-type: none"> • Escenario de crecimiento bajo • Relación de costo entre los vehículos eléctricos e híbridos y los vehículos de combustibles convencionales > 91% 	52%	41%
Vulnerabilidad 2: “Escaso uso del transporte público, alta demanda del transporte de carga y vehículos eléctricos costosos”	<ul style="list-style-type: none"> • Relación de costo entre los vehículos eléctricos e híbridos y los vehículos de combustibles convencionales > 123% • Tasas de ocupación bajas de SUV, sedanes y minivanes < 133% • Crecimiento del uso del transporte público < 18% • Demanda del transporte de carga ligera > 10,14 Gtkm 	56%	27%

Referencias del Apéndice C

Bryant, Benjamin P. y Robert J. Lempert: “Thinking Inside the Box: A Participatory, Computer-Assisted Approach to Scenario Discovery”, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 77, N.º 1, enero de 2010, pp. 34–49.

Friedman, Jerome H. y Nicholas I. Fisher: “Bump Hunting in High-Dimensional Data”, *Statistics and Computing*, Vol. 9, 1999, pp. 123–143.

Hornik, Kurt, Achim Zeileis, Torsten Hothorn y Christian Buchta: “RWeka: An R Interface to Weka”, R package version, 03-04, 2007. Al 7 de octubre de 2020:
<https://CRAN.R-project.org/package=RWeka>

Quinlan, J. Ross: *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Series in Machine Learning, San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1993.

Apéndice D. Partes interesadas

Para este estudio, conversamos con los partes interesadas en múltiples oportunidades. La siguiente lista identifica las agencias u organizaciones que participaron al menos de uno de los talleres con las partes interesada:

- 5C
- Acciona Energía
- ACOPE: Asociación Costarricense de Productores de Energía
- ACEPESA: Asociación Centroamericana para la Economía, Salud y el Ambiente
- AED: Alianza Empresarial para el Desarrollo
- AFD: Agencia Francesa de Desarrollo
- Aliarse: Amigos of Costa Rica
- BCCR: Banco Central de Costa Rica
- Cámara Nacional de Productores de Leche
- CANABUS: Cámara Nacional de Autobuseros
- CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
- CCAFS: CGIAR Climate Change, Agriculture, and Food Security, Climate-Smart Agriculture in Costa Rica
- CENIGA: Centro Nacional de Información Geoambiental
- CICR: Cámara de Industrias de Costa Rica
- COMEX: Ministerio de Comercio Exterior
- Coopesantos: La Cooperativa de Electrificación Rural Los Santos
- CORFOGA: Corporación Ganadera
- CPSU: Centro Para la Sostenibilidad Urbana
- CTP: Consejo de Transporte Público
- DCC: Dirección Cambio Climático
- DIGECA: Dirección de Gestión de Calidad Ambiental
- DINARAC: Dirección Nacional de Resolución Alternativa de Conflictos
- DPRSA: Departamento de Regulación de los Programas e la Salud y Ambiente (un departamento del Ministerio de Salud)
- EBI Costa Rica: Empresas Berthier EBI de Costa Rica S.A.
- EGP: Enel Green Power
- Fortech
- Fundecooperación Para el Desarrollo Sostenible
- GBCCR: Consejo de Construcción Verde de Costa Rica
- Geocycle
- GIZ: una agencia de desarrollo alemana
- Green Building Council – CR
- IDB: Banco Interamericano de Desarrollo
- ICAFE: Instituto del Café de Costa Rica
- ICE: Instituto Costarricense de Electricidad
- IMN: Instituto Meteorológico Nacional
- INA: Instituto Nacional de Aprendizaje
- Laica
- MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería
- MEIC: Ministerio de Economía, Industria y Comercio
- Metalub: empresa privada
- MINAE-DIGECA: Ministerio de Ambiente y Energía-Dirección de Gestión de Calidad Ambiental
- MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes
- ONF: Oficina Nacional Forestal
- Pedal Movilidad Sostenible
- RECOPE: Costa Rican Petroleum Refinery S.A.
- Red de Juventudes y Cambio Climático
- SEPSE: Secretaría de Planificación, Susector de Energía
- SINAC: Sistema Nacional de Áreas de Conservación
- South Pole: Consultoría
- TEC: Tecnológico de Costa Rica
- UCR: Universidad de Costa Rica
- UNDP: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
- Viceministerio de Aguas y Mares
- Viceministerio de Energía

Los líderes mundiales están buscando reactivar sus economías y, al mismo tiempo, preservar el clima y reducir el riesgo de futuras crisis ambientales. El Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica fija el objetivo de alcanzar cero emisiones netas al 2050 y expone una serie de medidas que las agencias del gobierno, el sector privado, y en general los ciudadanos costarricenses tendrán que implementar en toda la economía a fin de lograr la descarbonización. La medida en que la implementación del Plan puede formar parte de un esfuerzo de reactivación económica pospandemia depende de los costos y beneficios socioeconómicos que ese conlleve.

En este estudio, estimamos los costos y beneficios de la implementación del plan de descarbonización, basándonos en consultas con numerosos organismos gubernamentales, industrias y organizaciones no gubernamentales. En nuestro escenario de referencia, la descarbonización aporta 41 mil millones de dólares americanos en beneficios netos a Costa Rica entre 2020 y 2050, usando una tasa de descuento del 5%. En el sector de uso del suelo, la descarbonización da lugar a un aumento de la productividad agrícola y ganadera, mientras una mayor captura de carbono por los bosques genera mayores servicios ecosistémicos, tales como productos forestales no maderables, beneficios para el agua y el suelo, y apoyo al turismo y al patrimonio cultural. En el sector transporte, los beneficios económicos derivados del ahorro de energía, el menor número de accidentes, el tiempo ahorrado gracias a la reducción de las presas y la disminución de los efectos negativos de la contaminación atmosférica en la salud compensan con creces los costos iniciales del cambio a vehículos eléctricos y de la construcción de infraestructura para un transporte público con cero emisiones netas. El ahorro de energía en edificios, el aumento de la eficiencia en la industria y el valor económico de los materiales reciclados y del agua tratada completan nuestras estimaciones.

Reconociendo la incertidumbre sobre el futuro, evaluamos miles de futuros plausibles buscando explorar una gama de posibles rutas de descarbonización y de beneficios netos asociados para la economía costarricense. En todos salvo en 21 de los más de 3 mil futuros plausibles considerados, la implementación del plan de descarbonización da lugar a beneficios económicos superiores a los costos. Nuestros resultados también relevan la importancia de algunos factores para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas, incluyendo las tecnologías de cero emisiones y el cambio modal en el sector del transporte, el aumento de la captura de carbono en el sector forestal y la reducción de las emisiones en la ganadería y los procesos industriales. Este estudio ha contribuido a preparar modelos analíticos y crear capacidad para evaluar las estrategias de descarbonización que serán utilizadas para apoyar la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Costa Rica— la cual constituye su compromiso con la comunidad internacional en virtud del Acuerdo de París. Nuestro enfoque también puede ser replicado en otros países interesados en analizar las implicaciones económicas de las rutas hacia una prosperidad libre de carbono.

