

DOCUMENTO DE TRABAJO DEL BID N° IDB-WP-01157

Rutas de descarbonización profunda en América Latina: desafíos y oportunidades

Bataille, Christopher
Waisman, Henri
Vogt-Schilb, Adrien
Jaramillo, Marcela
Delgado, Ricardo
Arguello, Ricardo
Clarke, Leon
Wild, Thomas
Lallana, Francisco
Bravo, Gonzalo
LeTreut, Gaëlle
Nadal, Gustavo
Godinez, Guido
Quiros-Tortos, Jairo
Pereira, Eunice
Howells, Mark
Buir, Daniel
Tovilla, Jordi
Farbes, Jamil
Ryan, Jones
De La Torre Ugarte, Daniel
Collado, Mauricio
Requejo, Fernando
Gomez, Ximena
Soria, Rafael
Villamar, Daniel
Rochedo, Pedro
Imperio, Mariana
Briand, Yann
Svensson, Johannes

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Cambio Climático

Septiembre 2020

Rutas de descarbonización profunda en América Latina: desafíos y oportunidades

Bataille, Christopher
Waisman, Henri
Vogt-Schilb, Adrien
Jaramillo, Marcela
Delgado, Ricardo
Arguello, Ricardo
Clarke, Leon
Wild, Thomas
Lallana, Francisco
Bravo, Gonzalo
LeTreut, Gaëlle
Nadal, Gustavo
Godinez, Guido
Quiros-Tortos, Jairo
Pereira, Eunice
Howells, Mark
Buirá, Daniel
Tovilla, Jordi
Farbes, Jamil
Ryan, Jones
De La Torre Ugarte, Daniel
Collado, Mauricio
Requejo, Fernando
Gomez, Ximena
Soria, Rafael
Villamar, Daniel
Rochedo, Pedro
Imperio, Mariana
Briand, Yann
Svensson, Johannes

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Cambio Climático

Septiembre 2020

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

Rutas de descarbonización profunda en América Latina: desafíos y oportunidades / Christopher Bataille, Henri Waisman, Adrien Vogt-Schilb, Marcela Jaramillo, Ricardo Delgado, Ricardo Argüello, Leon Clarke, Thomas Wild, Francisco Lallana, Gonzalo Bravo, Gaëlle LeTreut, Gustavo Nadal, Guido Godinez, Jairo Quiros-Tortos, Eunice Pereira, Mark Howells, Daniel Buira, Jordi Tovilla, Jamil Farbes, Jones Ryan, Daniel De La Torre Ugarte, Mauricio Collado, Fernando Requejo, Ximena Gómez, Rafael Soria, Daniel Villamar, Pedro Rochedo, Mariana Imperio, Yann Briand, Johannes Svensson.

p. cm. — (Documento de trabajo del BID ; 1157)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Carbon dioxide mitigation-Latin America. 2. Greenhouse gas mitigation-Latin America. 3. Climatic changes-Government policy-Latin America. 4. Environmental policy-Latin America. I. Bataille, Christopher. II. Waisman, Henri. III. Vogt-Schilb, Adrien. IV. Jaramillo, Marcela. V. Delgado, Ricardo. VI. Argüello, Ricardo. VII. Clarke, Leon E. VIII. Wild, Thomas. IX. Lallana, Francisco. X. Bravo, Gonzalo. XI. LeTreut, Gaëlle. XII. Nadal, Gustavo. XIII. Godinez, Guido. XIV. Quiros-Tortos, Jairo. XV. Pereira, Eunice. XVI. Howells, Mark. XVII. Buira, Daniel. XVIII. Tovilla, Jordi. XIX. Farbes, Jamil. XX. Ryan, Jones. XXI. Torre Ugarte, Daniel de la. XXII. Collado, Mauricio. XXIII. Requejo, Fernando. XXIV. Gómez, Ximena. XXV. Soria, Rafael. XXVI. Villamar, Daniel. XXVII. Rochedo, Pedro. XXVIII. Imperio, Mariana. XXIX. Briand, Yann. XXX. Svensson, Johannes. XXXI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. XXXII. Serie.

IDB-WP-1157

Códigos JEL: Q54

Palabras clave: Descarbonización, Rutas de descarbonización, Desarrollo, Energía, AFOLU

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2020 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

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.

Después de un proceso de revisión por pares, y con el consentimiento previo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), una versión revisada de esta obra puede reproducirse en cualquier revista académica, incluyendo aquellas indizadas en EconLit de la Asociación Americana de Economía, siempre y cuando se reconozca la autoría del Banco y el autor o autores del documento no hayan percibido remuneración alguna derivada de la publicación. Por lo tanto, la restricción para recibir ingresos de dicha publicación sólo se extenderá al autor(s) de la publicación. Con respecto a dicha restricción, en caso de cualquier incompatibilidad entre la licencia Creative Commons IGO 3.0 Atribución-No comercial - NoDerivatives y estas declaraciones, prevalecerán estas últimas.

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.



Rutas de descarbonización profunda en América Latina: desafíos y oportunidades

Bataille, Christopher. Institut Du Développement Durable Et Des Relations Internationales (IDDRI.org), 41 Rue du Four, París, 75006, Francia.

Waisman, Henri. Institut Du Développement Durable Et Des Relations Internationales (IDDRI.org), 41 Rue du Four, París, 75006, Francia.

Vogt-Schilb, Adrien. Banco Interamericano de Desarrollo (IADB.org). 1300 New York Avenue, N.W. Washington, D.C. 20577, USA

Jaramillo, Marcela. Banco Interamericano de Desarrollo (IADB.org). 1300 New York Avenue, N.W. Washington, D.C. 20577, USA

Delgado, Ricardo. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia.

Arguello, Ricardo. Universidad del Rosario, Facultad de Economía y Universidad de Ibagué, Decano de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Ibagué, Colombia.

Clarke, Leon. Profesor de Investigación y Director de Investigación, Centro para la Sustentabilidad Global, Escuela de Políticas Públicas, Universidad de Maryland, College Park, MD 20740.

Wild, Thomas. Profesor Asistente de Investigación, Centro Interdisciplinario de Ciencias del Sistema Terrestre de la Universidad de Maryland, College Park, MD 20740.

Lallana, Francisco. Investigador, Fundación Bariloche, Departamento de Energía. (8400) S.C. Bariloche, Argentina.

Bravo, Gonzalo. Investigador, Fundación Bariloche, Departamento de Energía. (8400) S.C. Bariloche, Argentina.

LeTreut, Gaëlle. Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), Nogent-sur-Marne CEDEX, Francia

Nadal, Gustavo. Investigador, Fundación Bariloche, Departamento de Energía. (8400) S.C. Bariloche, Argentina.

Godinez, Guido. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Quiros-Tortos, Jairo. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Pereira, Eunice. Escuela de Ingeniería y Gestión Industrial, Real Instituto de Tecnología KTH, Estocolmo, Suecia.

Howells, Mark. Universidad de Loughborough – Epinal Way, Loughborough, Leicestershire, LE11 3TU, Reino Unido.
Imperial College London - South Kensington, Londres SW7 2BU, Reino Unido

Buira, Daniel. Director Ejecutivo, Tempus Analítica A.C., Ciudad de México

Tovilla, Jordi. Director Científico, Tempus Analítica A.C., Ciudad de México

Farbes, Jamil. Director, Evolved Energy Research, San Francisco, CA 94115.

Ryan, Jones. Cofundador, Evolved Energy Research, San Francisco, CA 94115.

De La Torre Ugarte, Daniel. Universidad del Pacífico (Lima, Perú) y Universidad de Tennessee (Knoxville, EE. UU)

Collado, Mauricio. Universidad del Pacífico (Lima, Perú)

Requejo, Fernando. Universidad del Pacífico (Lima, Perú)

Gómez, Ximena. Universidad del Pacífico (Lima, Perú)

Soria, Rafael. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, 17-01-2759 Quito, Ecuador.

Villamar, Daniel. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, 17-01-2759 Quito, Ecuador.

Rochedo, Pedro. Programa de Planificación Energética, Escuela de Postgrado de Ingeniería, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco C, Sala 211, Cidade Universitaria, Ilha do Fundão, 21941-972, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Imperio, Mariana. Programa de Planificación Energética, Escuela de Postgrado de Ingeniería, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco C, Sala 211, Cidade Universitaria, Ilha do Fundão, 21941-972, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Briand, Yann. Institut Du Développement Durable Et Des Relations Internationales (IDDRI.org), 41 Rue du Four, París, 75006, Francia.

Svensson, Johannes. Institut Du Développement Durable Et Des Relations Internationales (IDDRI.org), 41 Rue du Four, París, 75006, Francia.

Puntos destacados

- El proyecto Rutas de Descarbonización Profunda en América Latina (DDPLAC) incluyó equipos de Argentina, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México y Perú
- El objetivo del proyecto DDPLAC es crear capacidades de modelación de los sectores de energía y AFOLU, crear escenarios de DDP para alcanzar cero emisiones netas, establecer una comunidad e iniciar la participación de las partes interesadas.
- Teniendo en cuenta las emisiones actuales y el crecimiento potencial se identificaron como áreas clave los sectores de generación de electricidad, transporte personal y AFOLU.
- Se crearon escenarios de DDP para el sistema energético de Argentina, Colombia, Costa Rica, Ecuador y México, con exploraciones iniciales en el sector de AFOLU.
- Y para Perú, en particular, se creó un escenario de DDP más exhaustivo en el sector de AFOLU.
- Se identificaron rutas de mitigación para el transporte personal y la generación de electricidad.
- Se descarbonizaron mediante la electrificación gran parte de servicios, edificios, hogares y algunas industrias.
- Quedaron emisiones restantes significativas en los sectores de AFOLU, transporte de carga, industria, residuos, producción de petróleo y gas, que son todas áreas clave para esfuerzos futuros.
- Se identificaron áreas de investigación que requerirían cooperación internacional y diseño de paquetes de políticas nacionales para la ejecución de las rutas de descarbonización profunda.

Resumen

Este documento de síntesis presenta los objetivos, el enfoque y los resultados transversales del proyecto Rutas de Descarbonización Profunda en América Latina (DDPLAC). En él se sintetizan y comparan rutas de descarbonización profunda (DDP) nacionales y sectoriales hasta el 2050 que son compatibles con los objetivos del Acuerdo de París y con las prioridades de desarrollo nacional de Argentina, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México y Perú. Los cinco primeros países analizaron en detalle el sistema energético y a un nivel general el sector de agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU), mientras que en Perú se

enfocó en un análisis detallado del sector de AFOLU dado su predominio en las emisiones de GEI del país. Si bien se produjeron resultados para toda la economía, este documento se centra en los resultados de los sectores de electricidad, transporte de pasajeros y AFOLU. Esto debido a sus emisiones actuales, a su potencial de crecimiento y a la identificación de estrategias exitosas para la descarbonización (por ejemplo, el cambio a la generación de electricidad limpia y a otros combustibles de cero emisiones netas en toda la economía; la planificación urbana, el cambio de modo de transporte y la electrificación del transporte de pasajeros; y la agricultura sostenible intensiva, la asignación de derechos de uso de suelos y su aplicación, y la forestación en el sector de AFOLU). El documento resalta los sectores en donde aún quedan emisiones significativas en el 2050, en particular la industria, AFOLU, el transporte de carga y la producción de petróleo y gas, todos los cuales son áreas para investigaciones futuras. Además, propone ideas para el diseño de paquetes de políticas internas y permite identificar las prioridades para la cooperación internacional. Este análisis proporciona información crítica para las estrategias a largo plazo, las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional y el Balance Global en el contexto del Acuerdo de París.

1 Introducción

El Acuerdo de París estableció el objetivo de mantener el aumento de la temperatura media mundial “muy por debajo de 2 °C sobre los niveles preindustriales y continuar los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C” (Artículo 2.1). Esto requiere de cero emisiones netas globales de CO₂ provenientes del sector energía y del sector de cambio de uso del suelo para la segunda mitad del siglo (Artículo 4.1), específicamente para el periodo 2050-2070 para el objetivo de 1,5 °C - 2 °C[1,2], y probablemente emisiones netas negativas a partir de entonces. Los objetivos de la descarbonización profunda también se aplican a todos los gases de efecto invernadero; el CH₄ y el carbono negro deben reducirse a la mitad o más para el 2050, y el N₂O por lo menos a un tercio. El Acuerdo de París también destaca que estas reducciones de emisiones deben llevarse a cabo “en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza” y “a la luz de las diferentes circunstancias nacionales”. Esto significa que la descarbonización profunda a cero emisiones netas debe estar alineada con las prioridades de desarrollo de cada país. Es decir, la política climática sectorial y de toda la economía debe estar diseñada para optimizar las sinergias con otros objetivos tales como la seguridad energética, el crecimiento limpio, el empleo, la reducción de la pobreza, el acceso a la energía, la calidad del aire y el agua a escala local, entre otros [3,4,38]. También significa que la descarbonización profunda a cero emisiones netas solo puede alcanzarse mediante estrategias específicas para cada país que tengan en cuenta las oportunidades y los desafíos nacionales.

Las principales estrategias para la descarbonización profunda a cero emisiones netas son bastante conocidas: i) reducir la demanda que no mejora el bienestar; ii) mejorar la eficiencia energética y de materiales; iii) descarbonizar los vectores energéticos y los insumos materiales, y cambiar los usos finales hacia éstos; y iv) encaminar las reducciones de GEI mediante el uso del suelo y procesos técnicos de emisiones negativas [5–10]. Pero el desafío consiste en definir estrategias impulsadas por los países que apliquen estas amplias transformaciones de manera coherente con las circunstancias nacionales.

La descarbonización profunda a cero emisiones netas no significa que todos los países deban alcanzar la neutralidad de GEI. Sin embargo, es necesario que la trayectoria de las emisiones de cada región y cada sector se guíe por el objetivo de la carbono-neutralidad. Es posible que algunas regiones y sectores no

alcancen cero emisiones netas, pero esto implicaría que, a fin de compensar, otras regiones y sectores deberán alcanzar emisiones netas negativas. Desde la perspectiva del diseño de escenarios, esto significa ir más allá de la optimización bajo una restricción de carbono y en cambio centrarse en la evaluación de la máxima acción posible en cada sector y en la identificación de transformaciones clave impulsadas por los países a fin de lograr estas reducciones de emisiones o mejoras en los sumideros.

También sabemos que alinear las emisiones nacionales, regionales y sectoriales con la descarbonización profunda a cero emisiones netas no solo se trata de cuántas reducciones se logran a corto plazo, sino de cómo lograr reducciones profundas en todos los sectores, antes de mediados de siglo, mediante transformaciones fundamentales en el uso de energía y materiales de construcción, en el transporte y la industria, y en el uso de suelos agrícolas, urbanos y de otro tipo [3,5,11,12]. En contraste con el enfoque histórico de implementar primero las reducciones más baratas, la reducción a cero emisiones netas requiere seleccionar acciones a corto plazo que sienten las bases para los cambios técnicos, institucionales y de comportamiento a largo plazo necesarios para que todos los sectores se acerquen a cero emisiones netas o a emisiones negativas [13]. Para ello es necesario tener en cuenta la dependencia en las rutas, la inercia y los riesgos de bloqueo relacionados con el tiempo necesario para comercializar las nuevas tecnologías y que éstas sustituyan a las actuales, construcción de redes de suministro para los nuevos vectores energéticos, desarrollo de nuevos edificios e infraestructuras de transporte, modificación de patrones de uso del suelo, y cambio de los comportamientos de utilización de la energía. Esto requiere un planteamiento estratégico basado en un horizonte a largo plazo, a fin de fundamentar las decisiones a corto plazo en consonancia con las exigencias de estas transformaciones, según el Art. 4.19 del Acuerdo de París.

El método de Rutas de Descarbonización Profunda (DDP) [4] articula un proceso para diseñar las visiones de los países sobre estas transformaciones sectoriales interrelacionadas, el cual ayuda a orientar su aplicación. El método de DDP se basa en: i) la retrospección desde el objetivo de cero emisiones netas hasta el presente a fin de articular políticas y acciones a corto y largo plazo para llevar a cabo las transformaciones sectoriales; ii) el reconocimiento de la relación inextricable entre los objetivos de reducción de emisiones y los de desarrollo para investigar las sinergias y los riesgos de los costos y desafíos; iii) la necesidad de describir las transformaciones físicas detalladas de cada sector de manera comprensible para las partes interesadas y los expertos sectoriales; y iv) la identificación de posibles bifurcaciones para diseñar estrategias sólidas en un contexto de gran incertidumbre.

El método de DDP se utilizó durante el período previo al Acuerdo de París en 16 países industrializados y emergentes que representaban el 74% de las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía, con la finalidad de investigar un 50% de probabilidad de alcanzar 2°C basado en un modelamiento nacional en lugar de un modelamiento global [5,6]. Este DDP original contó con la participación de equipos de modelización experimentados, centrados principalmente en el suministro de energía y las emisiones de combustión¹. Se concibió como un proyecto de investigación de "validación de concepto" sin un compromiso estructurado de los países. Cada uno de los 16 equipos abordó el compromiso nacional de

¹ Solamente el equipo de Indonesia [33], y hasta cierto punto los equipos de Australia [34] y Brasil[35], realizaron análisis completos de las emisiones en el sector de agricultura, silvicultura y otros usos del suelo, comúnmente conocido como AFOLU.

manera diferente, desde aquellos que lo trataron como un ejercicio académico hasta quienes lo trataron como un compromiso pleno con los entes decisorios y las partes interesadas afectadas para ayudar a modificar las políticas nacionales.

El proyecto Rutas de Descarbonización Profunda en América Latina y el Caribe (DDPLAC) se basa en esta primera experiencia de investigar cómo seis países de América Latina y el Caribe (Argentina, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México y Perú) pueden mejorar su nivel de vida y desarrollarse, a la vez que reducen a cero sus emisiones netas de CO₂ entre mediados y finales de siglo, con reducciones apropiadas para otros GEI [36]. Actualmente las emisiones per cápita sin incluir residuos ni AFOLU oscilan entre 1,6 y 4,5 toneladas de CO₂ per cápita, mientras que la inclusión de residuos y AFOLU impulsa las divergencias a 2,2 y 7,6 toneladas de CO₂e per cápita. En estos seis países, la proporción de las emisiones producidas por el transporte (27%-70%) son más altas que el promedio mundial (25%), las emisiones de los edificios (3%-19%) están por debajo del promedio mundial (14%) en la mayoría de los países, mientras que las emisiones de la electricidad y la industria en su conjunto se sitúan alrededor del promedio mundial. Existen enormes divergencias entre las emisiones de los sistemas eléctricos de nuestros países de América Latina y el Caribe (desde 13 (Costa Rica) hasta 527 (México) gramos de CO₂/kWh en 2015), dependiendo del acceso regional a recursos como la energía hidroeléctrica.

En comparación con el primer proyecto DDP, el DDPLAC adopta un enfoque más amplio para cuatro objetivos específicos:

1. La construcción de modelos de energía y emisiones donde previamente no existían, a fin de permitir el desarrollo de capacidades nacionales para el análisis de los objetivos de desarrollo y de reducción de emisiones.
2. La creación de una comunidad regional de práctica de modelización, donde previamente no existía, a fin de facilitar el intercambio de conocimientos entre los países y el surgimiento ascendente de un enfoque regional respecto al desafío de la descarbonización profunda.
3. La formación y modelización de escenarios de casos de referencia con una narrativa cualitativa y cuantitativa, Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) y Rutas de Descarbonización Profunda (DDP), cubriendo las fuentes de emisión más importantes (Véase Cuadro 1 y Cuadro 2).
4. La utilización de estas capacidades, enfoques y resultados para establecer un compromiso estructurado y continuo con los formuladores de políticas y las partes interesadas con el fin de informar los procesos de la política climática nacional, sus estrategias a largo plazo (Art 4.19) y las NDC eventualmente revisadas (Art. 4.3 y 4.9) del Acuerdo de París.

Cuadro 1 Estimación de GEI para 2015: CO₂ (Mt) en la combustión y en el proceso industrial

Oferta y demanda de energía, y CO ₂ en el proceso industrial									
País	Pobl.	Trans. de pasajeros	Trans. de carga	Electricidad	Edificios res.	Edificios. com. (servicios)	Industria (Comb. y Proceso)	Total	CO ₂ per cápita
Promedio mundial		25%		21%	14%		40%		
Costa Rica	4,8	3,5	1,9	0,2	0,2	0,1	2,0	7,7	1,60
		45%	25%	2%	2%	1%	26%	100%	
Ecuador	16,3	6,9	5,2	8,1	3,2	1,0	14,4	38,8	2,38
		18%	13%	21%	8%	3%	37%	100%	
Colombia	47,0	14,5	14,0	16,9	7,0	1,5	41,3	95,1	2,02
		15%	15%	18%	7%	2%	43%	100%	
Argentina	43,1	29,2	19,5	39,1	26,3	4,7	48,5	167,3	3,88
		17%	12%	23%	16%	3%	29%	100%	
Perú '15 BUR	31,0	15,8		0,0	3,0		28,1	46,9	1,51
		34%		0%	6%		60%	100%	
México	121,0	106,3	35,6	137,6	19,5	5,9	239,0	543,9	4,50
		20%	7%	25%	4%	1%	44%	100%	

Cuadro 2 Estimación de GEI en residuos, agricultura, UTCUTS y GEI totales (CO₂e)

GEI en residuos, agricultura, silvicultura y otros usos del suelo							
	Residuos (CH ₄)	Agricultura (N ₂ O y CH ₄)	UTCUTS principalmente CO ₂	Emisiones totales de GEI sin combustión	Emisiones totales de GEI	Total de GEI distintos del CO ₂ per cápita	Total de GEI per cápita
Costa Rica	1,9	3,5	-2,4	3,0	10,7	0,6	2,22
	17%	33%	-22%				
Ecuador	2,2	14,3	33,9	16,5	55,2	1,0	3,39
	4%	26%	61%				
Colombia	9,5	45,2	69,0**	123,7	218,9	2,6	4,66
	2,74387	18%	54%				
Argentina	14,9	93,4	50,6	158,9	326,2	3,7	7,57
	5%	29%	16%				
Perú '15 BUR	7,7	19,0	93,0	119,7	166,5	3,9	5,37
	5%	11%	56%				
México	45,9	94,0	-140,0*	-9,1	534,8	-0,1	4,42
	8%	17%	-26%				

*Incluye absorciones del UTCUTS de bosques en pie, a diferencia de solo las de tierras administradas. Cada equipo eligió qué emisiones del sector de AFOLU reportar, con la condición de garantizar la transparencia de lo reportado.

** Incluye las estimaciones del equipo sobre la deforestación ilegal asociada con el fin de la guerrilla de las FARC en Colombia.

En este documento se describen los resultados sintéticos y transversales del proyecto DDPLAC. En la Sección 2 se describe el método Rutas de Descarbonización Profunda (DDP) tal como se aplica en este

Proyecto. La Sección 3 comienza con una descripción general de la transformación de DDP en los resultados colectivos del proyecto DDPLAC, y luego se analizan las transformaciones sector por sector. En la Sección 4 se examinan las implicaciones para el diseño del paquete de políticas nacionales y la cooperación internacional. En la sección 5 se presentan las conclusiones.

2 El Método de Rutas de DDP aplicado en América Latina y el Caribe

En aras de alcanzar los Objetivos 1 y 2 descritos anteriormente, es decir la creación y mejora de las capacidades de modelización y de una comunidad analítica, se estableció el proyecto DDPLAC² como una iniciativa del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), con el apoyo de la Agencia Francesa para el Desarrollo (AFD) y de la Plataforma Rutas 2050 (2050pathways.org), coordinado por el Instituto de Desarrollo Sostenible y Relaciones Internacionales (IDDRI.org). Se eligieron instituciones de seis países para participar en el proyecto: la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, la Universidad de Costa Rica, la Universidad del Pacífico en Perú, la Universidad de los Andes y la Universidad del Rosario en Colombia, Tempus Analítica en México, y la Fundación Bariloche en Argentina. Teniendo en cuenta el nivel de capacidad del que partían la mayoría de estos equipos, y conforme al objetivo del proyecto de establecer capacidades de modelización donde no existían, se seleccionaron seis instituciones con el fin de apoyar a los equipos: COPPE de la Universidad Federal do Rio de Janeiro para el equipo ecuatoriano, KTH (El Real Instituto de Tecnología Sueco) para el equipo de Costa Rica, la Universidad de Tennessee para el equipo de Perú, el Instituto de Investigación del Cambio Global Conjunto (JGCRI, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Maryland para el equipo de Colombia, Evolved Energy de EE. UU. para el equipo de México, y el Centre International de Recherche Sur L'environnement et le Développement (CIRED) de Francia para el equipo de Argentina. Con la finalidad de contribuir al objetivo 2, el BID organizó cuatro talleres durante el periodo 2018-2019 que fueron facilitados por el IDDRI, a los cuales asistieron todos los socios de ALC y sus equipos de apoyo, así como representantes del BID, la AFD y la plataforma Rutas 2050. Los marcos de modelización creados y mejorados por los equipos están resumidos en el Cuadro 3. Se invita a los lectores a consultar los documentos de los equipos en esta edición especial para ver información detallada de los marcos de modelación.

La selección del modelo utilizado en cada región es resultado de la combinación entre la capacidad de realizar una DDP compatible con el objetivo de 1,5 °C a 2 °C para los temas y sectores de interés (p. ej., reestructuración macroeconómica, transporte, electricidad, o AFOLU) [14] y las relaciones preexistentes con los equipos de mentores.

El equipo de Colombia eligió el modelo GCAM y a su equipo de apoyo por su capacidad de explorar el nexo entre el sistema de energía, AFOLU y agua. El equipo de México eligió Pathways debido a su enfoque en explorar la descarbonización profunda y transformadora a cero emisiones netas en todos los sectores en un contexto norteamericano. El modelo de Ecuador, ELENA, se construyó desde cero utilizando datos de Ecuador, pero se basó en el modelo MESSAGE de Brasil. Esto, en parte, debido a la gran comunidad de apoyo al modelo MESSAGE y a la larga relación del modelador principal con el equipo de mentores

² El proyecto DDP-LAC es financiado por el fondo Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático del BID (RG-T3028), el Fondo Climático Francés del BID (RG-T3193), la Plataforma de Rutas 2050, y la Agencia Francesa para el Desarrollo (AFD).

brasileños. El equipo de Costa Rica eligió el modelo OSeMOSYS, en parte debido a su naturaleza modular, que le permite aprovechar la capacidad existente de modelización de la electricidad. El equipo de Argentina eligió el modelo híbrido CGE IMACLIM debido a su deseo de explorar una DDP que conlleve un profundo cambio estructural macroeconómico.

Cuadro 3 Tipos de modelo utilizados por los equipos del proyecto DDPLAC

	Nombre o familia del modelo	Tipo de modelo	¿Incluye sistema de energía?	¿Incluye AFOLU?	¿Incluye vínculos mundiales?
Colombia	GCAM	Evaluación integrada, equilibrio parcial del mercado múltiple	Sí	Sí	Sí. Las emisiones de Colombia se fijaron dentro de las emisiones globales de 1,5 °C y 2 °C del modelo GCAM.
México	Rutas	Simulación	Sí	Algunas veces	No
Perú	POLYSYS	Equilibrio parcial	No, otros resultados de modelización utilizados	Sí, enfoque principal	No
Ecuador	MENSAJE "ELENA"	Evaluación integrada, optimización, equilibrio parcial	Sí	Sí, equilibrado dinámicamente con el sistema de energía: las demandas de energía útil y alimentos y los escenarios de deforestación y reforestación de los bosques se calculan exógenamente	No, pero se pueden incorporar elementos del modelo brasileño COFFEE, como el presupuesto de carbono de 1,5 °C que se utilizó.
Costa Rica	OSeMOSYS	Modelo de Optimización del Sistema de Energía	Sí	Se ha añadido un modelo externo para este proyecto. El equipo está expandiendo el modelo para capturar las sinergias del sector energético con el clima, la tierra y el agua para producir el modelo CLEW	No
Argentina	IMACLIM y LEAP	Simulación / modelo híbrido CGE	Sí	Modelo exterior añadido	Importaciones no energéticas a la cuota de producción y exportaciones resistentes a las condiciones de comercio. Tendencia del crecimiento mundial de las exportaciones no energéticas. Comercio exógeno de energía de LEAP

No se evaluó cuál sería el "mejor" modelo para una región determinada. En cambio, se adoptó una decisión pragmática en la que se combinó la relevancia científica de la colaboración teniendo en cuenta los temas clave de política que debían abordarse, con los aspectos prácticos de establecer la colaboración dadas las relaciones anteriores.

El Objetivo 3, es decir, la modelización de escenarios para representar casos de referencia "libres de políticas climáticas", el resultado de las NDC y las rutas de descarbonización profunda fue facilitado por la construcción de modelos en el Objetivo 2. Las NDC se modelaron según lo establecido hasta 2030. Para las DDP, según Waisman et al (2019) [4], se solicitó a cada equipo preparar un relato de economía política sobre la forma en que su país podría llegar a tener cero emisiones netas a partir de su situación actual. Dicho relato debía ser formulado de manera cualitativa o semicuantitativa y en un lenguaje comprensible para las principales partes interesadas. En cada relato se analizó la procedencia de las emisiones actuales y el uso final o las demandas sectoriales en las que éstas se basan. Por otro lado, se describió cómo podría transformarse el transporte de pasajeros, el transporte de carga, los edificios residenciales y comerciales, la industria, la agricultura y el uso del suelo para conseguir el objetivo final de cero emisiones netas. Luego los equipos simulaban estos relatos en sus modelos para traducirlos en indicadores cuantitativos.

Como parte clave del proceso, basándose principalmente en los resultados de sus modelos, se pidió a los equipos utilizar un "tablero" común para ingresar cada uno de sus escenarios, proporcionando de este modo una representación cuantitativa del "argumento" de cada uno de sus relatos. Los indicadores del tablero para el periodo 2015-2050 incluían indicadores nacionales en materia de población, estructura económica, emisiones del sistema energético y flujos de CO₂ del uso del suelo. Y para cada uno de los subsectores económicos todos los componentes de la identidad de Kaya que los equipos pudieran proporcionar, a saber, actividad, eficiencia/intensidad energética, cambio estructural e intensidad energética de las emisiones de GEI. Además, se pidió registrar las emisiones de gases distintos al CO₂ (CH₄, N₂O, SF₆, etc.) en caso de que fueran relevantes. También se incorporaron en los tableros indicadores sectoriales adicionales destacando los principales cambios en los impulsores medibles claves que describen las transformaciones físicas en los sectores de transporte personal, electricidad y AFOLU, los cuales se examinan en secciones posteriores. El escenario de DDP de cada país surge de una conjunción entre la narrativa del equipo, los resultados de las emisiones de GEI per cápita, la actividad de conducción, las variables de eficiencia e intensidad, y las descripciones de los cambios físicos de los impulsores específicas de cada sector.

Un punto clave del diseño de la metodología de las rutas de DDP es su naturaleza iterativa, apoyada por dos procesos de aprendizaje. Por un lado, los equipos de los países podrían comparar los resultados del tablero con el punto de referencia de los impulsores de las emisiones nacionales y sectoriales compatibles con el objetivo climático colectivo. Dichos puntos de referencia, derivados de la literatura, caracterizan la escala y el detalle del cambio transformador que se requiere para el 2050 a fin de alcanzar el objetivo de cero emisiones netas en la segunda mitad del siglo. Por otro lado, el tablero común permite comparar los supuestos de los distintos países y conocer la posibilidad de distintas acciones (véase el Objetivo 2).

Estos dos procesos de aprendizaje llevaron a los equipos a revisar progresivamente sus estrategias y los supuestos de los escenarios, en particular en lo que respecta a los potenciales técnicos de descarbonización en los diferentes sectores. Concretamente, en el cuarto taller se realizó un seminario en el que se compararon y contrastaron los resultados preliminares de las DDP de toda la economía y de los sectores de todos los equipos. Los equipos pudieron ver en qué situación se encontraban sus resultados con respecto a los demás equipos en términos de toneladas per cápita y principales causas de las emisiones por sector, y reevaluar si las diferencias tenían sentido o no. Los equipos tuvieron la

oportunidad de volver a simular sus DDP. Las rutas resultantes presentadas en este documento de síntesis y en los documentos de los equipos de los países de esta edición especial son los resultados finales de estas iteraciones. Dichos resultados constituyen una autoevaluación, realizada por los investigadores de los países, de las transformaciones físicas sectoriales que pueden elegirse para encaminar la economía nacional hacia el objetivo de cero emisiones netas.

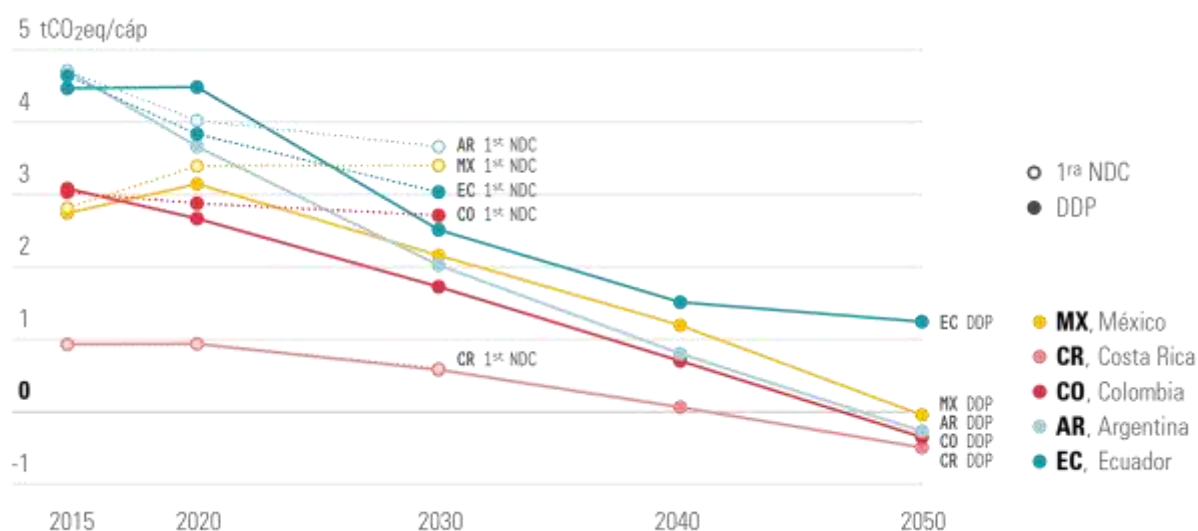
En la consecución del Objetivo 4, a saber, el compromiso con los formuladores de políticas, el BID tomó la iniciativa de contactar a los ministerios locales para presentarles a los equipos locales, en caso de que dicha relación no existiera previamente. El proceso de compromiso se centró en crear conciencia sobre la utilidad del proyecto DDPLAC para informar las estrategias de desarrollo a largo plazo con baja emisión de carbono, y para potencialmente actualizar las NDC de los países anteriores a la COP 21.

3 Resultados de la modelación:

3.1 Estimaciones de las NDC y las DDP a escala nacional

El Gráfico 1 presenta las estimaciones de los equipos del proyecto DDPLAC de las emisiones combinadas de CO₂ per cápita por combustión en toda la economía y del sector de AFOLU, tanto para las NDC de sus países hasta finales de 2019 como para uno de sus escenarios de Ruta de Descarbonización Profunda (DDP). Cada equipo produjo entre uno y cuatro escenarios de DDP para representar incertidumbres importantes para su respectivo país, como se sugiere en Waisman et al (2019). Luego, se les pidió seleccionar un escenario para realizar una comparación cruzada. El equipo de Perú no proporcionó una estimación de las NDC para las emisiones de combustión de energía.

Gráfico 1 Proyección de emisiones de CO₂ per cápita (tCO₂/cap) por combustión y AFOLU para, las NDC y las DDP, excluyendo otros GEI



Debido a limitaciones de espacio, presentamos el escenario de DDP más ambicioso de cada equipo, salvo en el caso de Argentina. Dicho equipo deseaba proporcionar más contexto al respecto y decidió exponer su ruta más ambiciosa en su documento de edición especial. Alentamos a los lectores a revisar los

documentos de los equipos de los países que figuran en esta edición especial para que puedan examinar más a fondo las estrategias de descarbonización profunda y sus resultados cuantitativos.

Numerosas investigaciones han demostrado que el actual conjunto mundial de NDC permite demasiadas emisiones para cumplir el objetivo de 1,5 a 2 °C [15–17], el cual requiere cero emisiones netas de CO₂ para 2050-2070 (y reducciones específicas de gases para los otros GEI). Y, es probable que dicho conjunto de NDC conduzca a un calentamiento de cerca de +3 °C. En América Latina también se da el caso de que las NDC de los principales países emisores no están alineadas con los objetivos del Acuerdo de París [18], y nuestros resultados respaldan este hecho, siendo Costa Rica una notable excepción.

En el Gráfico 1, las líneas continuas indican las DDP y las líneas punteadas indican las NDC de los equipos de los países que las proporcionaron. La mayoría de las NDC son cerca de 1/3 demasiado altas para ser compatibles con lo establecido en el Acuerdo de París, a menos que se logren reducciones drásticas o que se generen emisiones negativas a gran escala en el sector de AFOLU o tecnológicas en los años posteriores. Todas las NDC de los países de América Latina están sujetas a ajustes en los próximos años. ¿Podrán estos países aprovechar esta oportunidad para establecer planes tanto para elevar su nivel de vida como para desarrollarse, alcanzando a la vez cero emisiones netas de CO₂ entre mediados y finales de siglo? ¿Qué debe hacerse en cada sector?

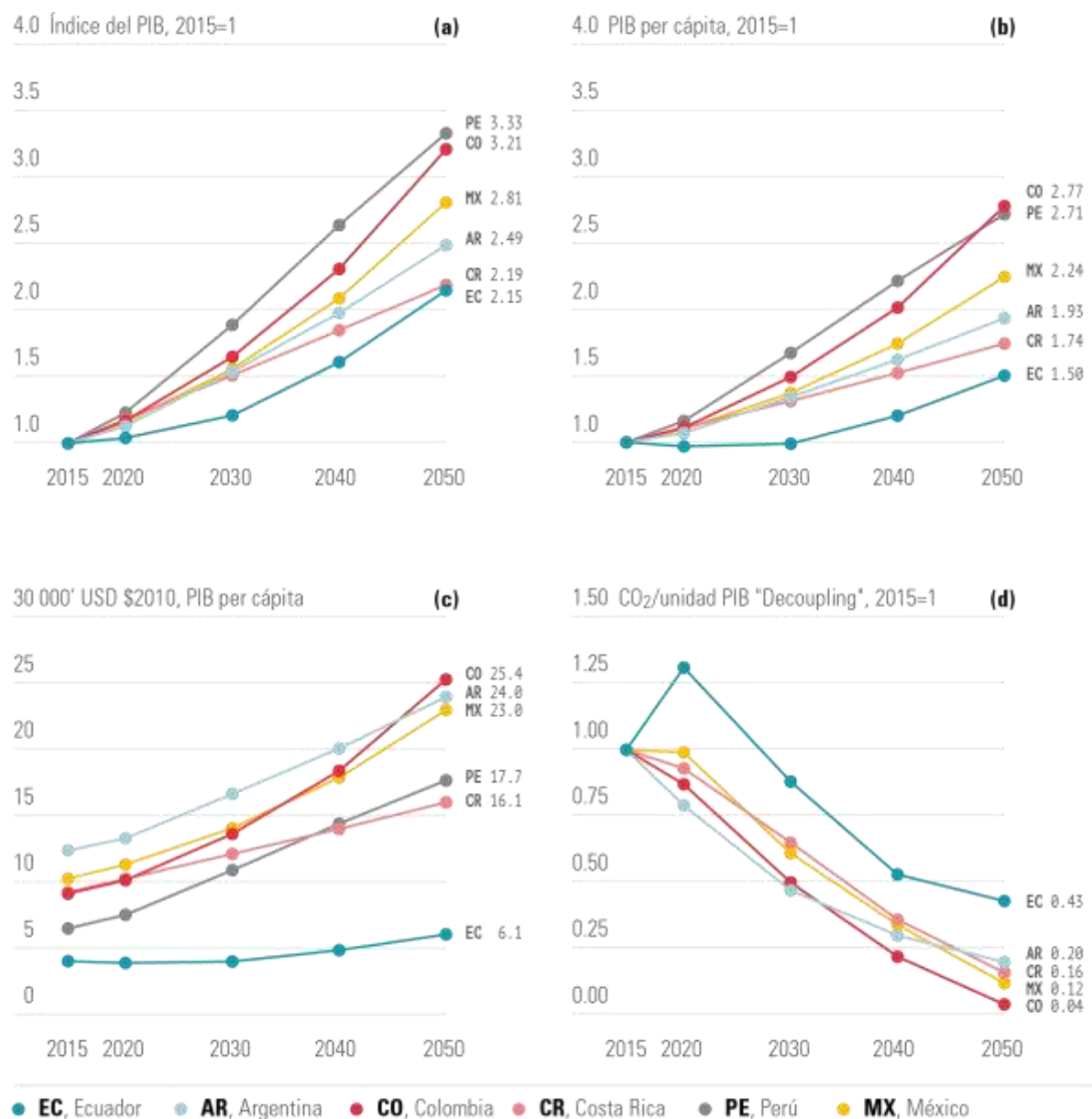
3.1.1 Desarrollo y disociación: PIB per cápita y GEI por unidad de PIB

Las narrativas individuales de las DDP de los países fueron estructurados a propósito para cumplir los objetivos tanto de desarrollo como de emisiones. En las diversas narrativas de los países se hace referencia al PIB per cápita, la seguridad del suministro de energía, la calidad del aire y del agua, la estabilidad macroeconómica, el bienestar público, la educación básica, y la transición de la población de la subsistencia al empleo formal. La mayoría de los países logran un crecimiento económico bastante sólido, mientras que los GEI de combustión por unidad de PIB disminuyen cerca de un 80% en la mayoría de los casos (Gráfico 2). El sólido crecimiento económico, en la mayoría de los casos, se basa en el apoyo a las prioridades de desarrollo. Remitimos nuevamente a los lectores a los documentos de cada país para ver los respectivos relatos, pero los resultados cuantitativos generales indican que se puede disociar en gran medida el PIB de las emisiones de GEI a lo largo del tiempo en el entorno de los países en desarrollo. Las rutas físicas para ello son la eficiencia energética, el ajuste y la reestructuración de la demanda, la descarbonización de los vectores energéticos y el cambio a éstos, y las reducciones directas mediante el uso del suelo y, en algunos casos, la biomasa con captura y almacenamiento de carbono. Los resultados sectoriales se muestran en secciones posteriores.

Hay una gran diferencia en el crecimiento per cápita a largo plazo en las DDP de los distintos países, con un crecimiento de la economía entre 2015 y 2050 del 50% per cápita (1,2%/año) para Ecuador, 74% (1,6%/año) para Costa Rica, 93% (1,9%/año) para Argentina, 124% (2,3%/año) para México, 171% (2,9%/año) para Perú, y del 177% (2,9%/año) para Colombia. Un escenario alternativo para Argentina (aunque no se muestra aquí, se puede encontrar en su documento de edición especial), basado en un retorno a la estabilidad macroeconómica a largo plazo, el crecimiento impulsado por el país y la reestructuración económica para "revalorizar" la economía, mostró un crecimiento del PIB per cápita del

3,7% anual hasta alcanzar la equivalencia con los niveles europeos mínimos al 2050, suponiendo que se mantuvieran las tasas de crecimiento histórico en Europa.

Gráfico 2 Índice del PIB (2015=1) (a) y PIB per cápita (b), USD 2010 per cápita (c) e índice de combustión CO₂/unidad de PIB (2015=1) (d)



Hubo un debate entre los equipos sobre la utilidad de las narrativas "conservadoras" frente a los "ambiciosos". Las narrativas conservadoras reflejan la realidad macroeconómica en ALC en la actualidad, representados por el escenario de Ecuador, y los ambiciosos reflejarían a ALC después de una generación de estabilidad política y macroeconómica y el consiguiente y rápido crecimiento de la productividad, representados con mayor fuerza por los escenarios de Colombia y Perú. Sin embargo, en todos los casos, se demuestra la disociación entre los GEI y el PIB.

3.1.2 Resultados sectoriales

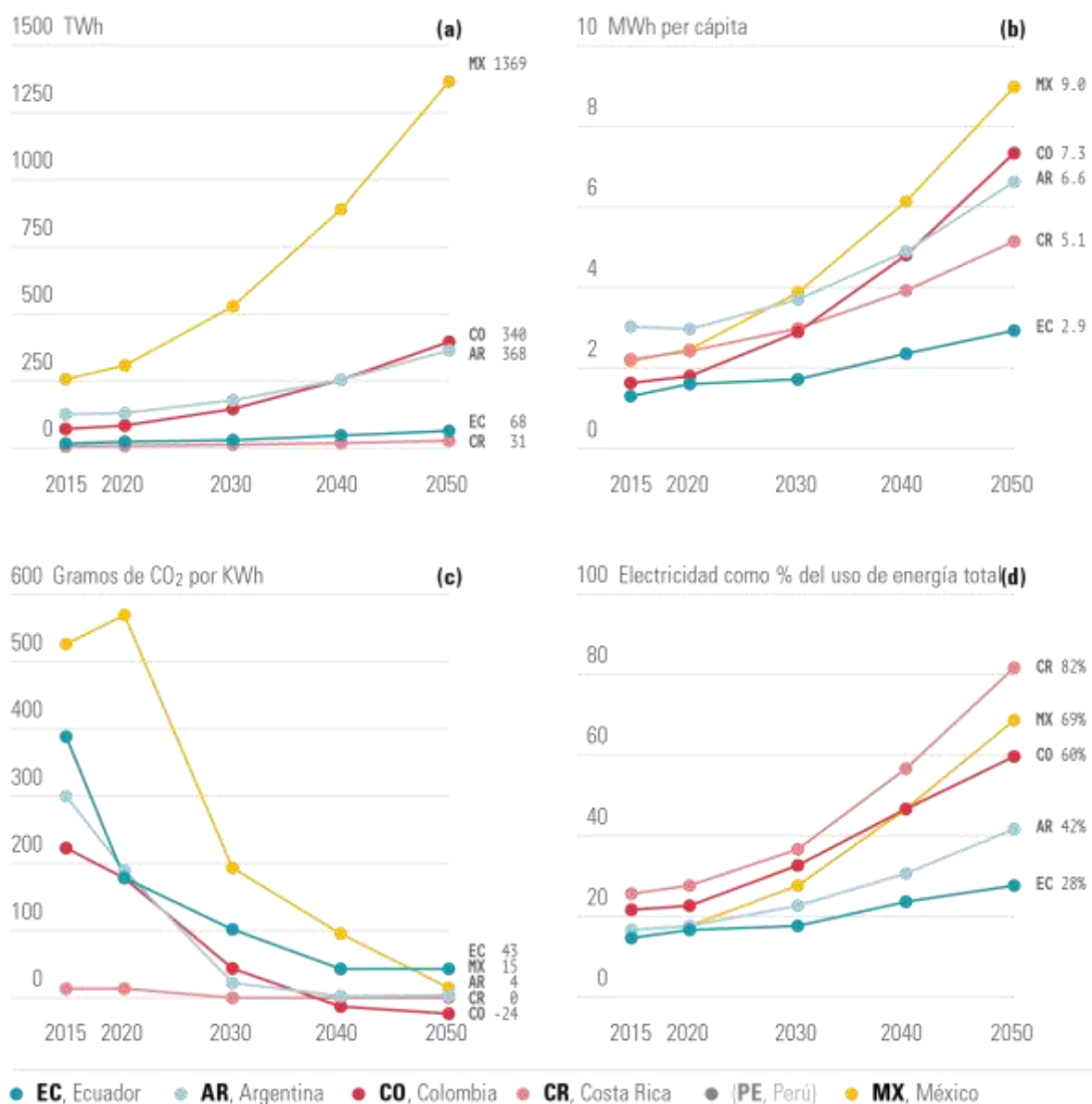
Los equipos del proyecto DDPLAC produjeron resultados detallados para el transporte de pasajeros y de carga, edificios residenciales y comerciales, industria pesada y ligera, generación de energía eléctrica, suministro de combustible líquido, y flujos de GEI en el sector de agricultura, silvicultura y otros usos del suelo. Por razones de espacio y debido al predominio de estas emisiones en un mundo de NDC y DDP, aquí nos centramos en los sectores de generación de electricidad, transporte de pasajeros y AFOLU.

3.1.2.1 Electricidad

Un factor común entre todas las DDP de nuestros equipos de países fue la transición de toda la economía hacia la electrificación de edificios, vehículos e industria combinada con la descarbonización de la producción de electricidad. La electricidad como parte del uso final aumentó del 15%-26% en 2015 al 28%-82% en el 2050; las diferencias se basan en el uso relativo de la electricidad para sustituir los combustibles líquidos para el transporte de pasajeros y de carga. La generación de electricidad aumentó 182%-428% para el 2050 para satisfacer las necesidades de desarrollo y permitir la descarbonización de los sectores de transporte, construcción e industria mediante la electrificación.

Ecuador, Argentina y Costa Rica aumentaron la producción de electricidad entre 182%-227%. En contraste, México y Colombia aumentaron la producción de electricidad entre 425%-428%. La mayor y más amplia electrificación en estos dos últimos países se debió principalmente a un mayor uso en el transporte de carga y en la industria, tanto de manera directa como en forma de electrocombustibles sintéticos. Costa Rica alcanza la mayor tasa de electrificación, pero desde un punto de partida más alto. Al mismo tiempo, la intensidad de GEI de la electricidad disminuye enormemente, de un promedio de 405 a 7 gramos de CO₂/kWh en toda la región. Sin embargo, cada país logró esta reducción de manera diferente (Gráfico 4), con distintos mixes de energía eólica, solar, hidráulica, de combustibles fósiles con captura y almacenamiento de carbono (CCS, por sus siglas en inglés), biomasa con CCS en Ecuador y Colombia, y nuclear en el caso de Argentina, que ya cuenta con una pequeña industria nuclear nacional. En particular, se asume que cada región tiene un acceso relativamente barato a recursos energéticos de baja intensidad de CO₂ (p. ej., energía hidráulica, biomasa, de combustibles fósiles o biomasa con CCS, nuclear), a fin de apoyar una alta penetración de energías renovables variables a un costo relativamente bajo por kWh.[19]

Gráfico 3 Generación total de electricidad en TWh (a), MWh per cápita (2015=1) (b), intensidad de GEI en gramos de CO₂/kWh (c), como % de todo el uso final de energía (d)



3.1.2.2 Transporte de pasajeros

Una comparación de las emisiones del transporte de pasajeros per cápita pone de relieve que los escenarios de DDP de México, Costa Rica, Colombia, Argentina y Perú implementan exitosamente la descarbonización, mientras que el escenario de DDP de Ecuador muestra que las emisiones del transporte se reducen inicialmente a la mitad, pero luego comienzan a aumentar a partir de 2040 (Véase el Gráfico 5). El equipo de Ecuador señaló que ello se debió a que la demanda de transporte per cápita aumenta más rápido que las reducciones de la intensidad de GEI en el escenario de DDP utilizado para la comparación. Esto pone de relieve la apremiante necesidad de la cooperación internacional para restablecer a cero las

emisiones de uso final de la tecnología del transporte mundial de pasajeros mediante la electrificación o mediante pilas de combustible de hidrógeno.

Gráfico 4 Matriz de generación de electricidad por país en 2050 (TWh absoluto y % de generación por país)

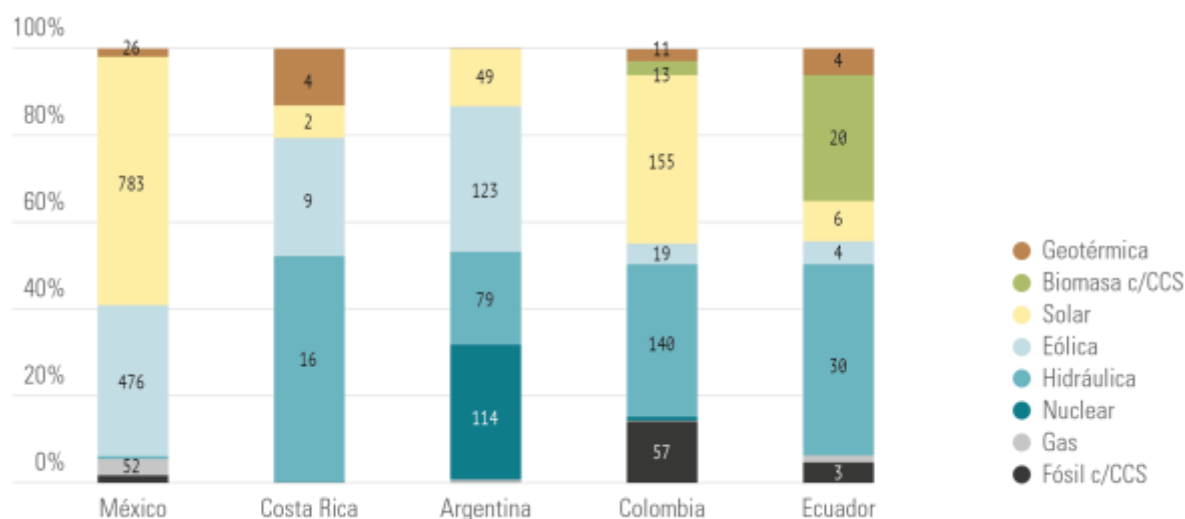
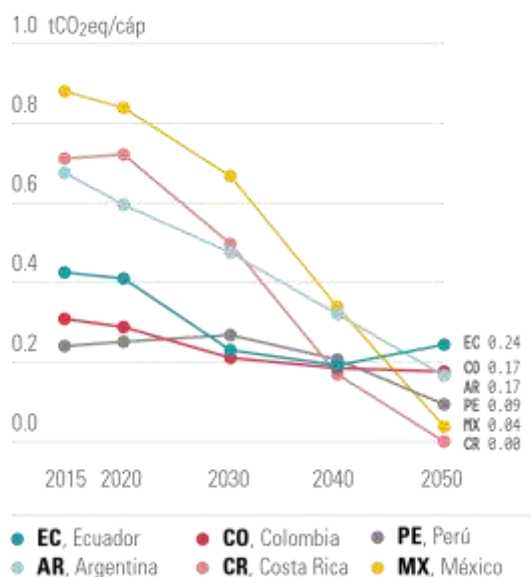


Gráfico 5 Emisiones del transporte per cápita



El Gráfico 6 descompone los cambios de manera integrada usando un método de descomposición LMDI [20,21] (véase el Apéndice sobre la metodología LMDI) de los efectos de población, kilómetros recorridos por pasajeros per cápita, eficiencia energética e intensidad de GEI de los combustibles. Como es de esperar, la población siempre aumenta las emisiones (-15% de los cambios totales en las emisiones), al

igual que pkm/cápita (-24%). Las mejoras en la eficiencia energética siempre reducen las emisiones (60%), al igual que la intensidad de GEI de los combustibles (78%).

Gráfico 6 Cambios en toneladas de Mt CO₂ anuales en el 2050 en comparación con el 2015 en las emisiones del transporte de pasajeros debido a la población, pkm/cápita, eficiencia energética e intensidad de GEI de los combustibles de uso final

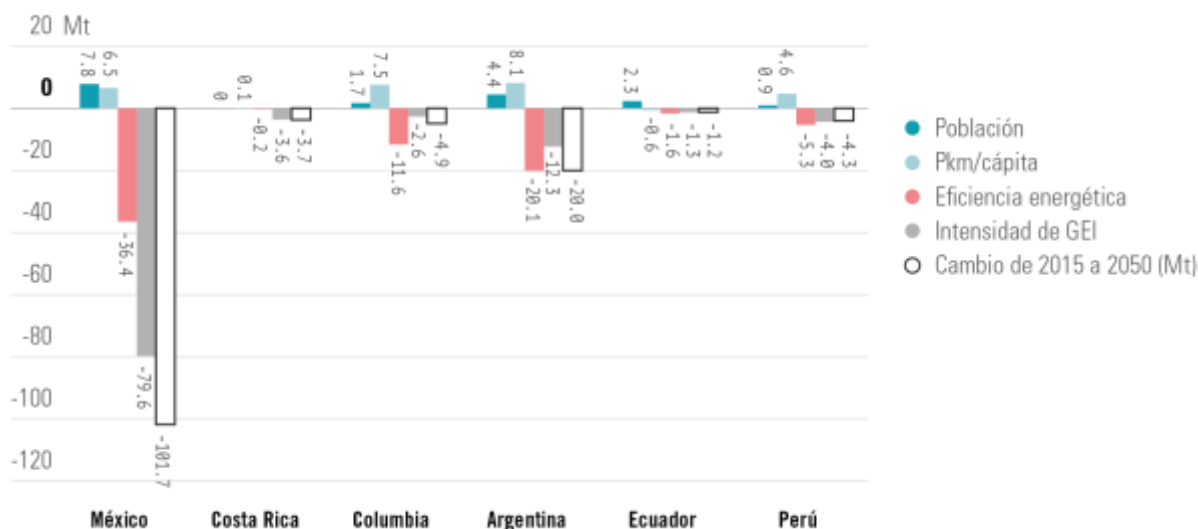
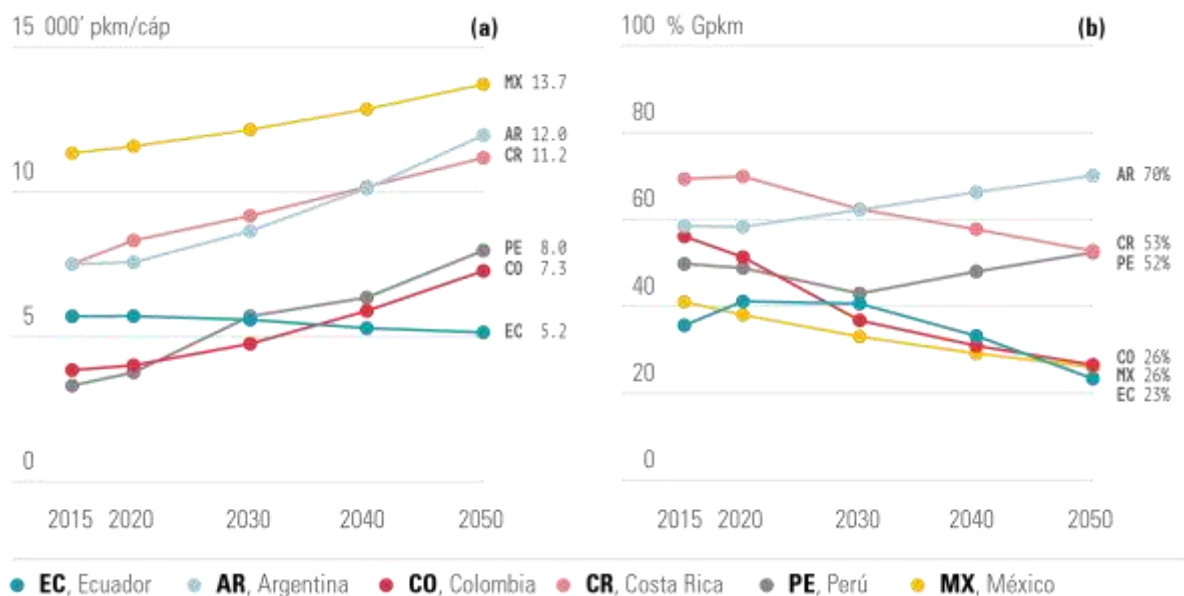


Gráfico 7 Distancia motorizada recorrida per cápita (pkm/cap) (a) y movilidad individual motorizada (automóvil + vehículo de dos ruedas) en porcentaje (% Gpkm) (b)



A fin de formular políticas para reducir las emisiones en el sector del transporte de pasajeros, o en cualquier otro sector, los principales impulsores deben ser aislados y abordados directamente. Las emisiones totales de GEI en el transporte de pasajeros son una función de la distancia recorrida, la tasa

de ocupación del vehículo, el grado de eficiencia del vehículo y el combustible utilizado, todo lo cual se ve afectado por la elección del modo de transporte.

La distancia motorizada recorrida per cápita aumenta en la mayoría de los escenarios de DDP, pero a ritmos diferentes (véase el Gráfico 7). Países como Colombia y Ecuador con un valor inicial bajo en 2015 experimentan grandes aumentos del 89% y el 140% para el 2050, mientras que países como Costa Rica y Argentina con un alto valor inicial en 2015 experimentan un crecimiento moderado del 49%-59% para el 2050. El escenario de DDP de México mostró un crecimiento más lento del 21%, mientras que el escenario de DDP de Ecuador mostró una reducción del 10% para 2050 en comparación con el 2015. México, a pesar de su crecimiento más lento, todavía alcanza la mayor distancia motorizada recorrida per cápita (13.753 pkm), mientras que Ecuador muestra el nivel más bajo en 5.170 pkm.

Sin embargo, el papel de la movilidad individual motorizada (realizada en automóvil o en vehículo de dos ruedas) cambia en los diversos escenarios de DDP; véase el segundo panel en el Gráfico 7. Los resultados de cuatro escenarios de DDP, incluyendo a México, Ecuador, Costa Rica y Colombia, indican que la reducción de la cuota modal de los automóviles y vehículos de dos ruedas en favor de un mayor transporte colectivo es una vía clave hacia la descarbonización profunda. En Costa Rica, la proporción de la movilidad individual motorizada disminuye del 70% en 2015 al 50% en 2050. Los escenarios de DDP de los otros tres países muestran que la cuota modal de automóviles y vehículos de dos ruedas disminuye del 35%-55% en 2015 al 25% en 2050.

Todas las transformaciones mencionadas anteriormente son el resultado de cambios estructurales en las zonas urbanas impulsados por estrategias de uso del suelo y de planificación urbana para reducir las distancias y el tiempo entre las actividades humanas; el desarrollo de un transporte público eficiente, asequible, seguro y cómodo; y los cambios de comportamiento hacia actividades locales y teleactividades. En cambio, en Perú y Argentina, se estima que la movilidad individual motorizada aumente al 52% y al 70% respectivamente de su movilidad total nacional. Esto se debe a un gran aumento de la movilidad en vehículos de dos ruedas en Perú (+400%) y a un gran aumento de la movilidad de automóviles en Argentina (+170%). En estos casos, como en el resto de los kilómetros recorridos por vehículos, sería obligatorio el eventual cambio de combustible a combustibles eléctricos, de hidrógeno, biocombustibles o combustibles de hidrocarburos sintéticos con cero emisiones.

El uso total de energía per cápita en el transporte de pasajeros se reduce considerablemente en todos los escenarios de DDP de 2015 al 2050, a pesar de las grandes mejoras en el nivel de vida. El uso de energía en el transporte de pasajeros per cápita se reduce -14% en Perú, -29% en Colombia, -30% en Ecuador, -50% en Argentina, -56% en México, y 62% en Costa Rica. Y se reduce más cuando la proporción de electricidad utilizada en el consumo final de energía es la más alta; la electrificación de los vehículos mejora intrínsecamente la intensidad energética de su uso final (GJ por km). La electrificación del consumo de energía final en el transporte alcanza el 6% en Ecuador, el 21% en Colombia, el 43% en Perú, el 53% en Argentina, el 66% en México, y el 100% en Costa Rica.

Estas diferencias en los resultados no reflejan necesariamente diferencias fundamentales sobre los países o los métodos de modelización, sino supuestos sobre el costo y la disponibilidad de diversas tecnologías de baja emisión. Si bien todos los países adoptan cierto nivel de cambio modal hacia autobuses eléctricos urbanos, hay resultados muy variados para los automóviles personales y el transporte interurbano

(Gráfico 8). Esto subraya la necesidad de reajustar las normas internacionales y las economías resultantes de la producción en masa de tecnologías de vehículos de pasajeros a niveles ultra bajos de emisiones (a saber, electricidad de baterías o células de combustible de hidrógeno). Estas tecnologías tienen el beneficio adicional sobre los biocombustibles que tienen cero emisiones de contaminantes atmosféricos locales.

Gráfico 8 Consumo total de energía para el transporte de pasajeros (PJ) (a) y electrificación de todos los vkm (%) a lo largo del tiempo (MJ/pkm, 2015=1) (b).

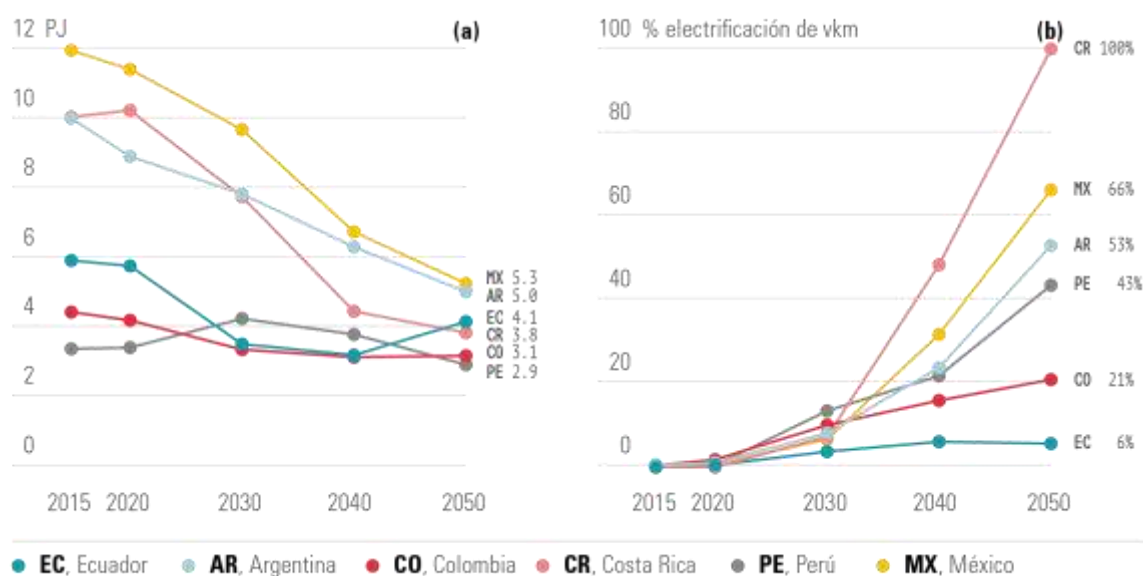
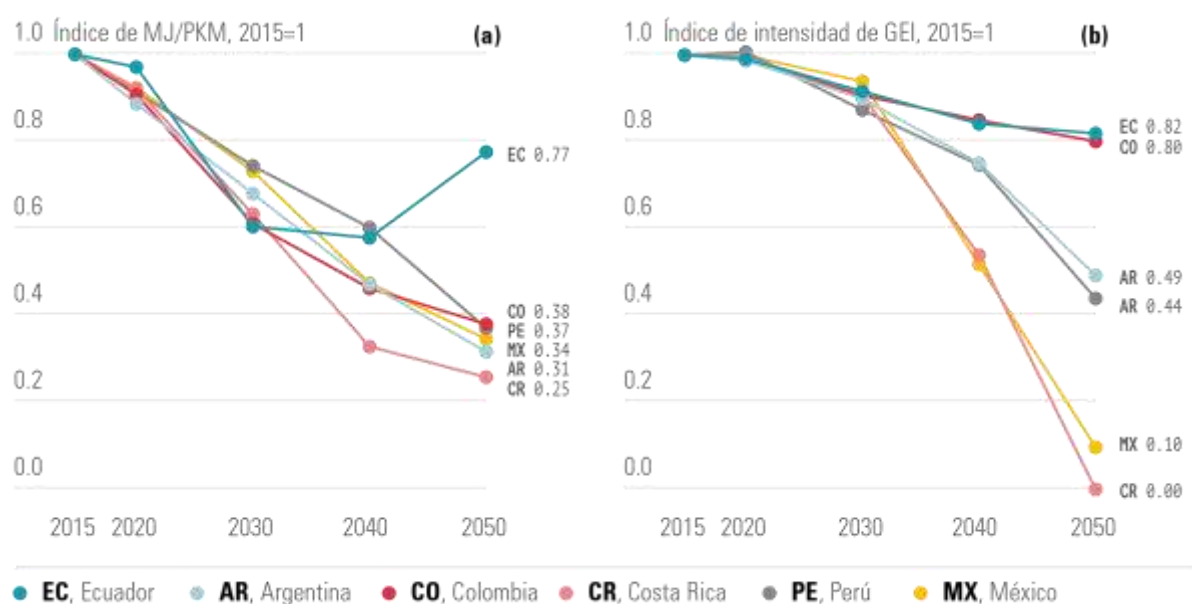


Gráfico 9 Eficiencia energética en el transporte de pasajeros (a) e intensidad total de GEI en el uso final del combustible (b)



En el Gráfico 9 observamos las mejoras en la eficiencia y la intensidad de GEI de los combustibles. La eficiencia energética mejora entre el 41% y el 75% en todos los países. Ecuador regresa a una menor eficiencia en el uso de combustible en años posteriores como resultado de la optimización del crecimiento acelerado permitido por las emisiones negativas del sector de AFOLU (véase debate posterior). La intensidad de GEI de los combustibles (sin incluir la electricidad) varía entre el -18% y -99% en todas las regiones, con casi todos los países evaluados enfocando de diferente manera la descarbonización de combustibles.

Podrían destacarse otras transformaciones específicas en los distintos escenarios de DDP, como el rol de la movilidad aérea a escala nacional, o los roles de los biocombustibles líquidos y del gas natural. Por ejemplo, en Ecuador y Perú, la movilidad aérea a escala nacional representa, respectivamente, el 10% y el 11% del total de los kilómetros recorridos por los pasajeros motorizados en el 2050, pero el 35% y el 47% del consumo total de energía del sector. El equipo de Perú estima que el biokerosene podría eventualmente reemplazar hasta el 30% de las necesidades de combustible líquido en la aviación, mientras que el equipo de Ecuador no considera los biocombustibles en la aviación.

En Colombia, el consumo de biocombustibles líquidos alcanza el 29% del consumo de energía final del transporte para el 2050; en Argentina, alcanza hasta el 11% para el 2040 antes de bajar al 4% para el 2050, siendo reemplazado por la electrificación. En Colombia, donde esta demanda de biocombustibles representa 49 PJ del consumo, sería un desafío significativo asegurar una producción suficiente y sostenible de biocombustibles para el transporte y la transformación del sector agrario. El gas natural fósil desempeña un papel esencial tanto en el escenario de DDP de Ecuador como en algunos de los escenarios de DDP de Argentina, representando respectivamente cerca del 49% y del 22% del consumo total de energía del sector. Sin embargo, el biogás no se tiene en cuenta. Hay un margen considerable para que algunos de los equipos consideren más ampliamente los vectores energéticos con menor contenido de carbono en su futura labor.

3.1.2.3 Otros sectores: residencias, servicios comerciales, transporte de carga

Repetimos el ejercicio de descomposición para los edificios residenciales (Gráfico 10), servicios comerciales (Gráfico 11), y el transporte de carga (Gráfico 12). No se analiza la industria, ya que no era una prioridad para los equipos de este proyecto, pero se discute al respecto en la siguiente sección, "Emisiones restantes en 2050".

En aquellos casos en que un equipo no proporcionó valores (p. ej., el cambio en m² residenciales por persona en Costa Rica), esto se incorpora en la descomposición como "ningún cambio desde 2015 hasta 2050".

El crecimiento de la población siempre aumenta las emisiones del sector residencial entre 2015 y 2050 (+8,7 Mt, o -21% del efecto total sobre las emisiones de -42.3 Mt CO₂). Los metros cuadrados por persona (o el total de los hogares en el caso de Argentina) se utiliza como la variable de estructura y también siempre aumenta las emisiones (+5.6 Mt, 13% “). La eficiencia energética (-5,5 Mt, 13% “) tiene efectos variables, disminuye las emisiones en Costa Rica, México y Argentina, y las aumenta en Colombia y Ecuador.

Gráfico 10 Cambios en toneladas Mt de CO₂ anuales en 2050 en comparación con 2015 en el sector residencial debido a población, metros cuadrados por persona, eficiencia energética e intensidad de GEI de los combustibles de uso final

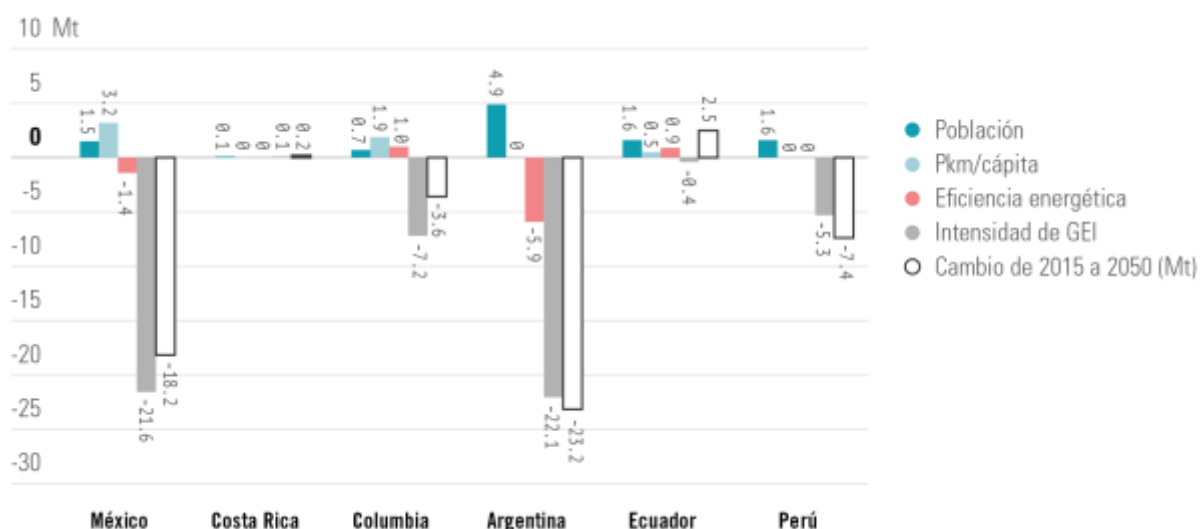
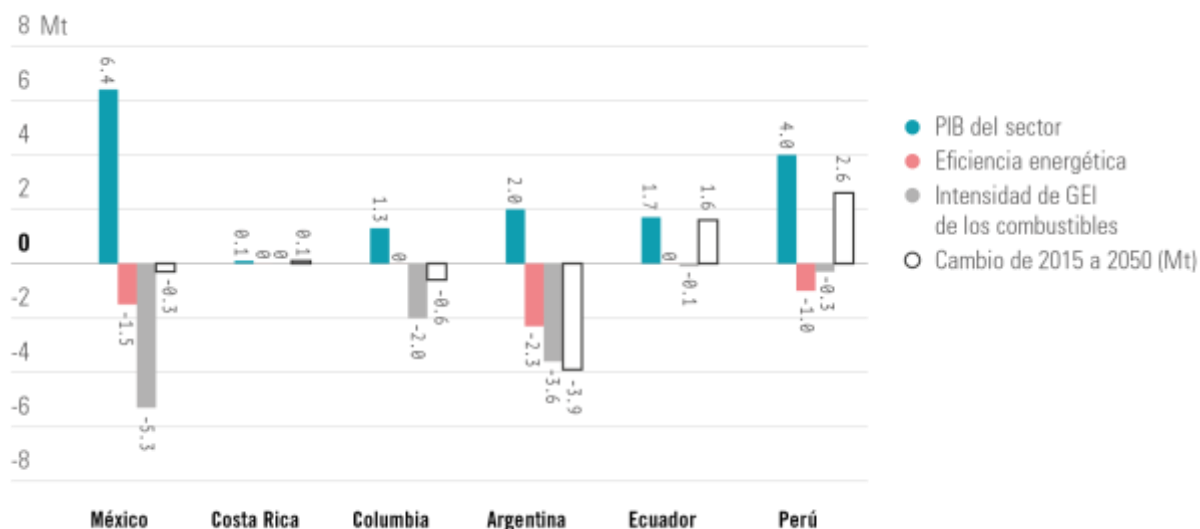


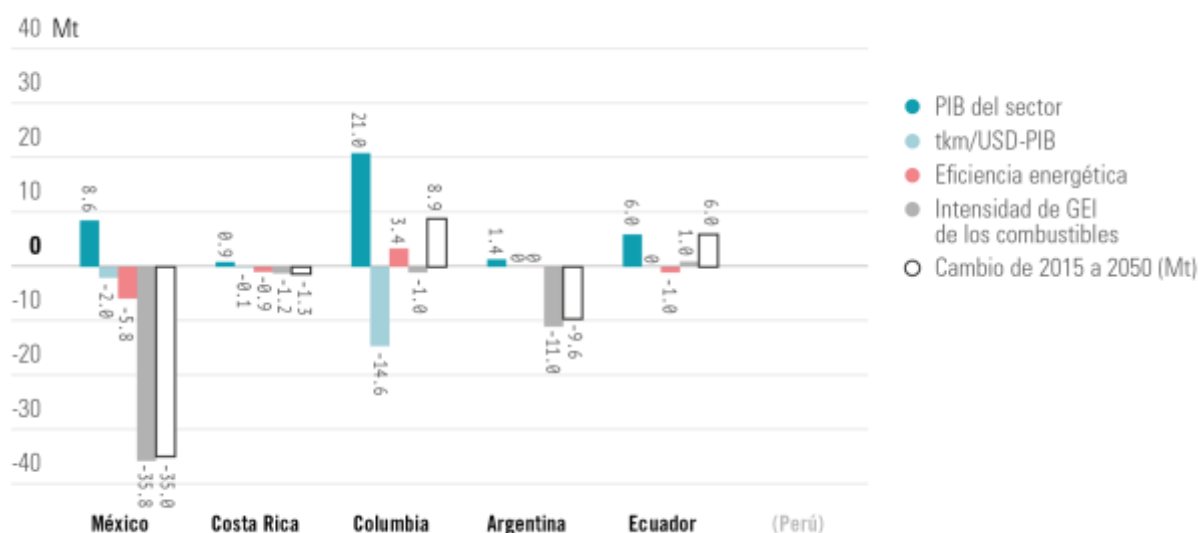
Gráfico 11 Cambios en toneladas Mt de CO₂ anuales en 2050 en comparación con 2015 en el sector de los servicios debido al PIB, la eficiencia energética y la intensidad de GEI



La intensidad de GEI disminuye en todos los países, principalmente debido a la conversión de combustible a electricidad (-51.2 Mt, 121%). En Costa Rica, Colombia, Ecuador y Perú las emisiones de GEI son afectadas por la transición de biomasa carbono-neutral hacia GLP, gas natural y electricidad para la preparación de alimentos y la calefacción. Este cambio tiene grandes beneficios para la salud asociados con la reducción de material particulado en el interior de la vivienda, pero se cuenta como un aumento de las emisiones de GEI en la medida en que se utilice el GLP o el gas natural. En general, la reducción de la intensidad de GEI de los combustibles utilizados (p. ej., la electrificación o el cambio a gases y combustibles líquidos bajos en carbono) tiene el mayor efecto de descarbonización.

El crecimiento del PIB sectorial (variable de la actividad) aumenta las emisiones de todo el sector de los servicios (+16,3 Mt, -265% del efecto total sobre las emisiones, -6.2 Mt). No se empleó una variable de estructura. La eficiencia energética principalmente disminuye las emisiones (-3.7 Mt, 60%). La intensidad de GEI siempre reduce las emisiones (-16.2 Mt, 262%), principalmente debido a la conversión de productos refinados del petróleo o gas natural a electricidad. En cuanto al sector residencial, el cambio de vector energético (electrificación y cambio a gases o combustibles líquidos bajos en carbono) tiene el mayor efecto de descarbonización.

Gráfico 12 Cambios en toneladas Mt CO2 anuales en 2050 en comparación con 2015 en el transporte de carga debido al PIB global, las toneladas-kilómetro por USD-PIB, la eficiencia energética y la intensidad de GEI



En el sector del transporte de carga los equipos dieron una gran variedad de respuestas. El PIB del sector se utiliza como variable de actividad y siempre aumenta las emisiones (+30,6 Mt, -97% del efecto total de las emisiones del sector). La medida tonelada-kilómetro por unidad del PIB nacional se utiliza como variable de estructura, y por lo general reduce las emisiones (-15 Mt, 48% “). El efecto de la eficiencia energética es variable entre los países (+0.6 Mt, 2%). La eficiencia energética puede mejorar a través de la eficiencia directa del equipo y del cambio modal interno (que a menudo se utiliza como una variable de estructura, pero no había datos disponibles en este caso). Por último, la intensidad de GEI de los combustibles es el efecto predominante que reduce las emisiones (-48.6 Mt, 154 % “). El 80% de este efecto se da en México, donde la intensidad del combustible se reduce a cero para el 2050 sobre la base de un cambio modal moderado a trenes eléctricos y a algunos camiones eléctricos de pila de combustible. El consumo residual de combustible líquido (aprox. el 25% de 2010) es sustituido por biocombustibles y combustibles sintéticos generados con electricidad.

Un hallazgo común en los tres sectores mencionados es la importancia de la conversión de combustible a vectores energéticos de baja emisión de GEI, es decir, la electrificación y el cambio a gases y combustibles líquidos de baja emisión. Si bien se necesitarán redes nacionales de distribución y combustible, en muchos casos se trata de tecnologías de uso final fabricadas a nivel mundial con normas globales comunes. Se

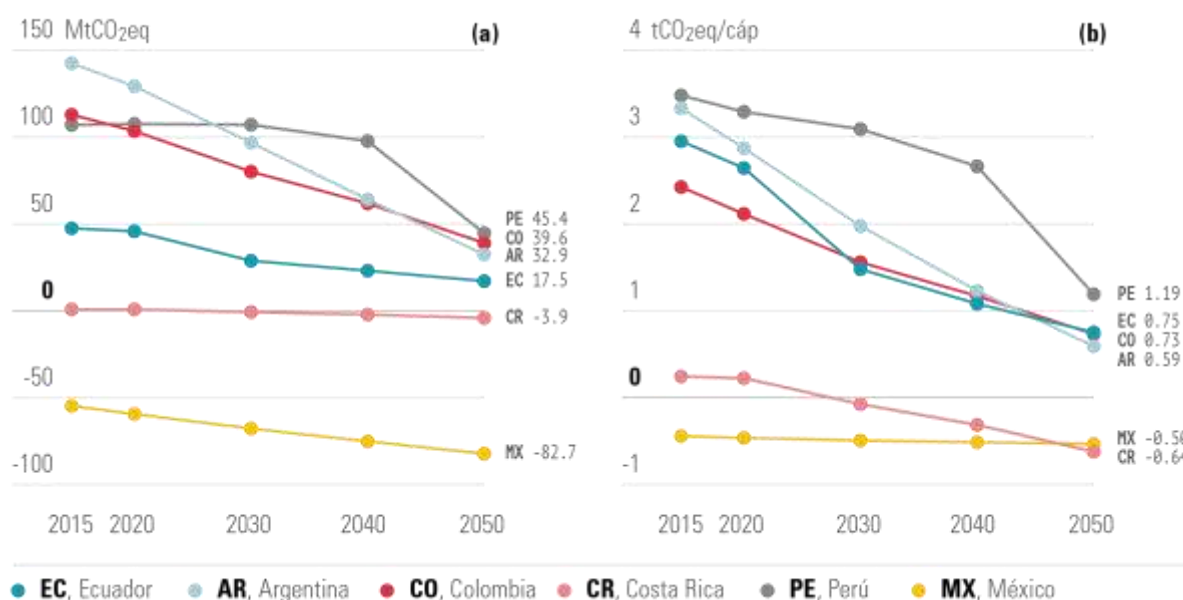
requerirá cooperación internacional para que esas transformaciones físicas se produzcan y sean asequibles en el contexto de un país en desarrollo.

3.2 Flujos de carbono en el sector de AFOLU

La descarbonización del sector de AFOLU para el 2050 será todo un desafío dada la creciente demanda de alimentos y el aumento o mantenimiento de las exportaciones agrícolas en la mayoría de nuestros países de ALC. Los seis países incluidos en este estudio proyectan trayectorias de emisiones del sector de AFOLU que disminuyen entre 2015 y 2050. Nótese que el sector de AFOLU incluye carbono de la silvicultura y otros usos del suelo, y metano y óxido nitroso principalmente de la agricultura. El gráfico 13 muestra las emisiones absolutas y per cápita de AFOLU.

México es el único país que tiene emisiones negativas netas en el 2015, sobre la base de la inclusión de flujos netos de carbono en tierras forestales y agrícolas previamente degradadas (-55 Mt/año en 2015), con el aumento del flujo negativo a -83 Mt/año para el 2050. Las emisiones de Costa Rica son las que más disminuyen durante el período, en un 436%, y llegan a ser negativas entre 2020 y 2030. Costa Rica tiene un largo historial de progreso en esta área, tras recuperar la cubierta forestal del 26% en 1983 al 52% en la actualidad. En cuanto a Argentina, Colombia, Ecuador y Perú, sus emisiones disminuyen significativamente (entre el 58% en el caso de Perú y el 77% en el caso de Argentina), y todos tienen emisiones positivas netas del sector de AFOLU en el 2050. En esta sección se analizarán por separado las emisiones derivadas del cambio de uso del suelo y aquellas derivadas de la agricultura.

Gráfico 13 Emisiones de la agricultura, la silvicultura y el cambio del uso del suelo: absolutas (Mt) (a) y toneladas de CO₂e per cápita (b)



En cuanto a las emisiones per cápita del sector de AFOLU, que hace posible las comparaciones entre los países, todos los países tienen emisiones per cápita decrecientes, con reducciones que van desde 0,09 toneladas per cápita para México hasta 3,04 toneladas per cápita para Argentina. Perú tiene las mayores emisiones per cápita en todo el período, pasando de 3,49 a 1,19 toneladas de emisiones de GEI por

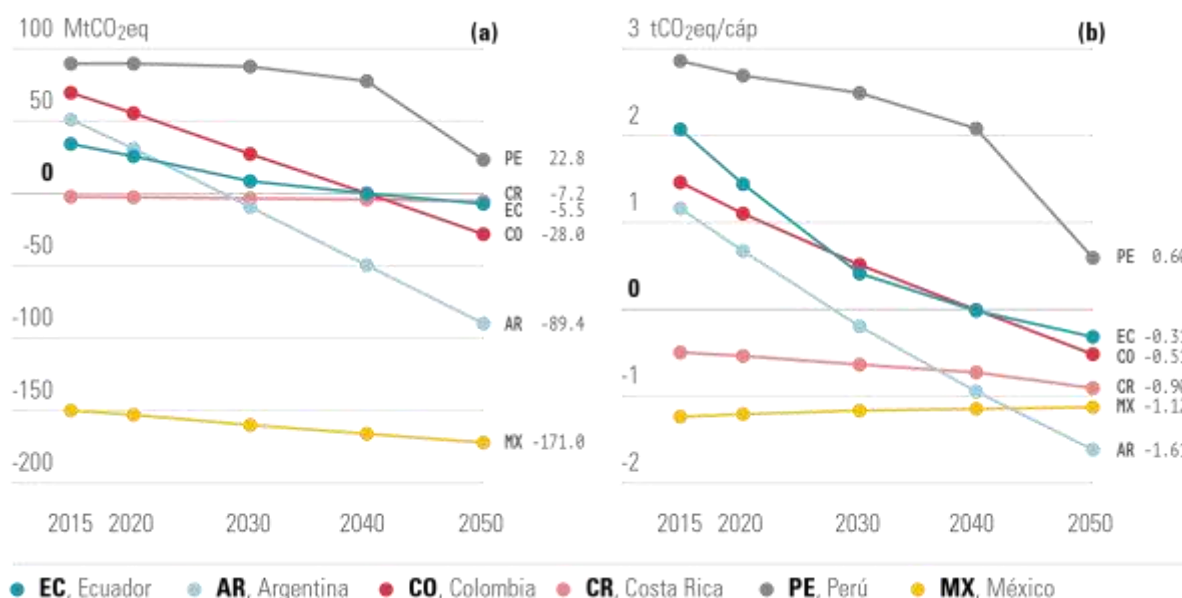
persona. Costa Rica, que tiene la menor población, tiene las emisiones más bajas en el 2050, con -0,64 toneladas de emisiones de GEI por persona.

3.2.1 Cambio de uso del suelo

En cuanto a las emisiones del cambio de uso del suelo (LUC, por sus siglas en inglés) (Gráfico 14), expresadas en CO₂, México y Costa Rica son sumideros netos en 2015, mientras que, en el 2050, Argentina, Colombia y Ecuador también evolucionan para tener emisiones negativas netas. México se destaca como el mayor sumidero neto, y captura aproximadamente 171 Mt de CO₂ anuales en el 2050, mientras que las emisiones anuales de Argentina son las que más se reducen en el período (en 140 MtCO₂).

Al interpretar estos resultados hay que tener en cuenta que el equipo de México ha incluido el gran sumidero anual del rebrote natural en tierras previamente agrícolas o degradadas. En su documento, el equipo incluye un debate específico sobre la necesidad de preservar y mejorar estos sumideros, lo que podría hacer que potencialmente se consideren como "tierras gestionadas" bajo las normas contables de la CMNUCC.

Gráfico 14 Emisiones por cambio de uso del suelo por país: absoluto (Mt CO₂) (a) y per cápita (toneladas de CO₂ por persona) (b) excluyendo todos los GEI que no son CO₂



La deforestación y la forestación (y el crecimiento en tierras post-agrícolas previamente deforestadas en México) son los principales impulsores negativos y positivos de las emisiones de GEI por el cambio de uso del suelo. Los otros tipos de suelo juegan un papel relativamente pequeño porque ninguno de los equipos incluyó el carbono del suelo, el principal medio por el que otros tipos de suelo capturan el carbono. Los bosques capturan carbono a través del proceso de crecimiento natural de árboles y otras plantas. En la misma medida, si la cantidad de biomasa en el bosque disminuye como consecuencia de la extracción o quema de madera, o de la descomposición natural de los árboles muertos, el bosque libera el carbono de nuevo a la atmósfera.

Hay tres subcategorías de emisiones forestales (incluidas las emisiones negativas) que ocurren en los escenarios de los países: ganancias de tierras forestales, que comprenden tanto la forestación (cuando las tierras que antes no estaban cubiertas por bosques pasan a ser forestales) como la reforestación (cuando las tierras que antes estaban cubiertas por bosques pasan a ser forestales); la pérdida de tierras forestales (deforestación); y las tierras forestales remanentes (que ganan o pierden el carbono almacenado en la biomasa).

El aumento de la captura de carbono anual en los bosques existentes explica la mayor parte de las emisiones negativas del LUC en Argentina y México. La forestación o reforestación también es un factor importante que contribuye a las emisiones negativas en Argentina, México y Perú. No obstante, este último tiene emisiones positivas de la deforestación que superan las negativas de la forestación o reforestación. Ecuador y Perú son los únicos países que proyectan cierta deforestación, mientras que los otros cuatro no presentan datos o proyectan cero deforestación. Las emisiones de la deforestación han cesado para el 2035 en el caso de Ecuador mientras que para Perú permanecen estáticas.

En Argentina, Ecuador y México, la superficie de los bosques se amplía a un 1-4% de la superficie nacional. En los tres casos, el uso anterior de suelos forestados o reforestados era principalmente como pastizales para el pastoreo de animales. En Perú y Costa Rica, la cubierta forestal permanece estática, aunque hay cambios en la cubierta de otros tipos de uso del suelo.

El documento de edición especial de Perú es uno de los pocos que formula un paquete de políticas para reducir la deforestación, aumentar la forestación y reducir las emisiones generadas por la agricultura. El paquete de políticas se basa en la idea de que las intervenciones de descarbonización en los bosques deben inducir a las partes interesadas a valorar el uso sostenible y la conservación de un ecosistema que tardó siglos en desarrollarse. Dicho paquete se basa en cinco pilares: i) gestión forestal sostenible; ii) reforestación comercial; iii) asignación y aplicación de derechos, especialmente en el caso de las poblaciones indígenas y los agricultores de subsistencia; iv) amplios incentivos y ayuda a las comunidades nativas; y v) ayuda a la gestión de áreas naturales protegidas. También incluye medidas para aumentar la diversificación de productos, mejorar el proceso en curso de pasar a productos de mayor valor, reducir la intensidad del uso de fertilizantes e introducir períodos secos en los arrozales a fin de reducir la formación de metano. Por último, sugiere el uso de la forestación comercial, especialmente para amortiguar el crecimiento de bosques amazónicos primarios. Esto último se analiza con más detalle en secciones posteriores.

Hay algunas diferencias contables importantes entre los países, y esto complica una comparación directa. Por ejemplo, Argentina y México son los dos únicos países que consideran la captura de carbono en tierras forestales remanentes, y esta categoría de emisiones desempeña un papel importante en el total de las emisiones de ambos países. Colombia, Costa Rica, Ecuador y Perú no tienen en cuenta esta categoría de emisiones negativas, lo que podría contribuir a explicar los bajos niveles de emisiones negativas de estos cuatro países.

Otra diferencia potencial es el alcance de las emisiones relacionadas con los bosques que se tienen en cuenta. Perú y Costa Rica son los únicos países que tienen en cuenta la captura de carbono de los bosques secundarios y los cultivos/plantaciones permanentes. Ambos proyectan que la superficie de los bosques primarios seguirá siendo la misma.

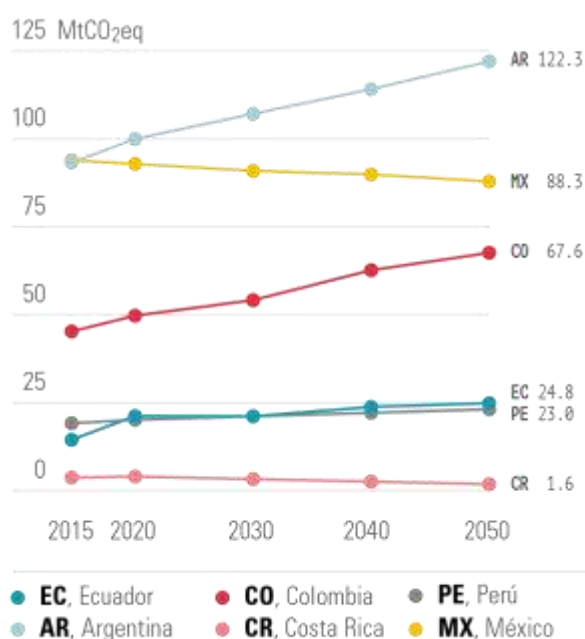
Los análisis que se realicen en el futuro podrían centrarse en lograr una mayor coherencia en la presentación de los informes, pero hay cuestiones políticas importantes relacionadas con la presentación de informes en lo que respecta a los inventarios de emisiones del uso del suelo, por ejemplo, ¿qué flujos son los que los países pueden y deben tener en cuenta y de qué flujos deben responsabilizarse?

3.2.2 Agricultura

Todos los países enfrentan un crecimiento demográfico (16%-29%). El incremento poblacional y el mantenimiento o aumento de las exportaciones agrícolas ejercen una presión sobre el sector agrícola, el cual debe aumentar sustancialmente su producción para mantener un nivel similar de seguridad alimentaria, en caso de que el país aumente sus importaciones de productos alimenticios o reduzca sus exportaciones. En algunos países, una parte importante de la producción agrícola se destina a la exportación, que suele ser una fuente importante de ingresos y empleo.

El total de las emisiones agrícolas de cada uno de los escenarios de DDP se indica en el Gráfico 15, y se compone de diversas mezclas de metano procedentes de la fermentación entérica, la descomposición de óxido nitroso de los fertilizantes sintéticos, el metano de los arrozales y de una combinación de emisiones procedentes de otras prácticas de gestión de suelos. Colombia (+50%), Argentina (+31%), Ecuador (+73%) y Perú (+17%) aumentan sus emisiones totales en el período, mientras que Costa Rica (-53%) y México (-6%) disminuyen sus emisiones.

Gráfico 15 Emisiones de la agricultura, CH_4 y N_2O ($MtCO_2e$)



La principal fuente de emisiones agrícolas en todos los países incluidos en este estudio es el metano procedente de la fermentación entérica, que surge de la digestión de los rumiantes, principalmente del ganado vacuno. Las emisiones de óxido nitroso procedentes de la aplicación de fertilizantes sintéticos también desempeñan un papel fundamental en muchos de los países. Las emisiones derivadas de la

aplicación de fertilizantes tienden a aumentar más que las emisiones de la fermentación entérica (FE) en los escenarios de los países.

Tanto en el caso de México como en el de Argentina, las emisiones de fertilizantes aumentan mientras que las de FE disminuyen. En el caso de Ecuador y Colombia, las emisiones de fertilizantes aumentan mucho más que las emisiones de FE, ya que ambas fuentes de emisiones aumentan. Y la excepción a esta tendencia se da en Perú, donde las emisiones de fertilizantes se estancan mientras que las emisiones de FE aumentan.

Lo anterior indica que para disminuir las emisiones del sector de AFOLU, es más fácil mitigar las emisiones de la producción animal que las emisiones de la producción vegetal. Una tendencia paralela en los escenarios de los países es que, en la mayoría de los casos, los rebaños de ganado permanecen estáticos, o por lo menos crecen en un porcentaje inferior al del uso de fertilizantes, que aumenta considerablemente para todos los países. Es necesario seguir investigando todo lo anterior para determinar las vías de descarbonización profunda para la agricultura.

3.2.3 Análisis adicional sobre el sector de AFOLU

Situar las emisiones agrícolas en relación con la producción total ofrece otra perspectiva, aportando indicaciones sobre la capacidad de descarbonización del sector al mismo tiempo que alimenta a una población en crecimiento y mantiene las exportaciones.

Todos los países incrementan su producción de alimentos y la mayoría de ellos de manera sustancial. Argentina aumenta más la suya, e incrementa la producción de cultivos en un 63% (en toneladas) y los rebaños en un 46% (en cabezas de ganado), gran parte de los cuales se exportan. Costa Rica registra los incrementos más bajos, un incremento del 9% en la producción de cultivos y del 2% en los rebaños de ganado. Lo más importante es que cinco de los seis países también logran reducir sus emisiones por unidad de producción (tanto por tonelada de rendimiento de los cultivos como por cabeza de ganado), Costa Rica en más del 400% (lo que es posible ya que sus emisiones son negativas netas). La única excepción es México, que aumenta sus emisiones por unidad de producción.

El aumento de la producción agrícola puede explicarse en todos los casos por la intensificación de la agricultura (es decir, el aumento de la producción por unidad de tierra). Esta intensificación se ve reflejada en el aumento de los rendimientos y en el incremento de la densidad de ganado. Todos los países, excepto Costa Rica, aumentan drásticamente sus rendimientos, que oscilan entre el 43% en el caso de Perú y el 68% en el caso de Ecuador.

La densidad de ganado permanece estática en México y Ecuador, pero aumenta un 24% en Perú y un 70% en Costa Rica. Por lo tanto, todos los países intensifican la producción vegetal o animal, y dos países (Perú y Argentina) intensifican ambas. El incremento en la aplicación de fertilizantes sintéticos contribuye a la intensificación de la producción vegetal, la cual aumenta en todos los países excepto en Perú; y en México se duplica con creces. Por otra parte, la intensificación se ve reflejada en las reducciones de la tierra total utilizada para la producción agrícola, que incluye tanto tierras de cultivo para la producción vegetal como pastos para los animales y la producción de forraje. Ecuador, Costa Rica y México disminuyen la tierra disponible para la producción agrícola, en hasta un 17% en el caso de Costa Rica. La superficie de tierras agrícolas no varía en Argentina, mientras que Perú aumenta sus tierras agrícolas.

Al diseccionar el sector de AFOLU en agricultura y cambio de uso del suelo, queda claro que la descarbonización en los escenarios de los países se logra principalmente gracias a la reducción de emisiones derivadas del cambio de uso del suelo y no de las emisiones agrícolas (las cuales aumentan en cuatro de los seis países). Como se ha mencionado anteriormente, esto podría explicarse en parte por la creciente población en cada país. Otra explicación, citada por el equipo de Argentina, es la capacidad de liberar grandes extensiones de tierra para la forestación (la misma explicación podría aplicarse tal vez a los casos de Ecuador y México, que también forestan o reforestan de manera considerable).

Curiosamente, todos los países del presente estudio han optado por seguir una ruta que, de un modo u otro, intensifica la producción agrícola. Dicha ruta, por un lado, se basa en actividades agrícolas intensivas en emisiones (p. ej., la aplicación de fertilizantes), mientras que, por otro lado, libera tierras para la forestación o reforestación, permitiendo así la reducción de emisiones. En resumen, incluso con el mejoramiento de la productividad y tecnología agrícola, así como con las mejores prácticas para una agricultura sostenible, existen costos y desafíos significativos entre el uso de las tierras para la agricultura, ganadería, silvicultura o como sumideros de carbono.

3.3 Emisiones restantes en 2050

El Gráfico 16 indica las emisiones absolutas restantes de GEI en 2050 para cada país en los escenarios de DDP. Esto resulta interesante porque contiene tanto una resistencia legítima a la mitigación, que requerirá innovación y políticas más sólidas y creativas, como rutas de descarbonización aún no exploradas por los equipos. El Gráfico 17 traduce esto en toneladas comparables de CO₂ equivalente per cápita.

Si bien se debe tener cuidado al comparar los resultados de países con circunstancias nacionales muy diferentes, es necesario destacar algunas cosas.

En primer lugar, la naturaleza muy variada de las emisiones del sector de AFOLU refleja en parte la naturaleza de los flujos naturales y aquellos provocados por el hombre en cada país, así como el nivel de ambición para reducir las emisiones de este sector. Algunos equipos (Ecuador y Colombia) optimizaron los modelos de oferta y demanda de energía incluyendo el sector de AFOLU, los demás modelaron esto por separado del sistema energético.

En segundo lugar, se han eliminado en gran medida emisiones de la electricidad, los edificios residenciales y los servicios; las rutas de descarbonización son bastante conocidas para estos sectores, p. ej., la reducción de la intensidad de GEI de los combustibles mediante la electrificación. Se mantienen niveles variables de emisiones en el transporte de pasajeros y de carga, dependiendo del grado de planificación urbana, el cambio de modo de transporte y las opciones tecnológicas de los vehículos consideradas en los escenarios de DDP, incluyendo supuestos bastante variables respecto al potencial para la electrificación de baterías, adopción de biocombustibles o pilas de combustible de hidrógeno. Quedan emisiones considerables en la industria ligera y de uso intensivo de energía, las cuales, aunque no eran objeto de este proyecto, merecen una mayor atención en el futuro.

Gráfico 16 Emisiones de GEI restantes para el 2050 en los escenarios de DDP de los países, incluyendo flujos negativos (Mt/año)

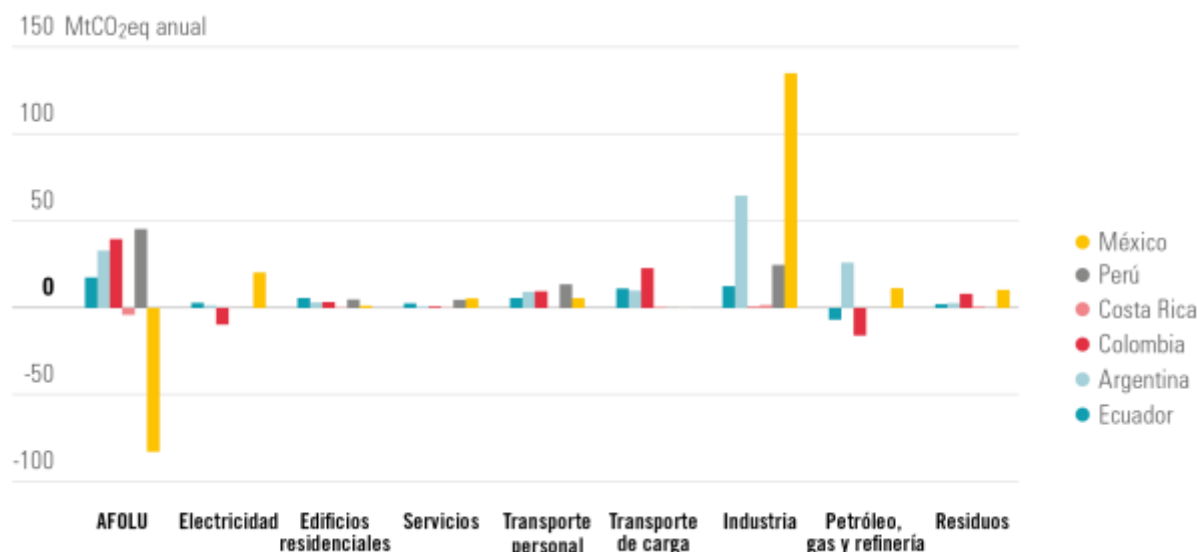
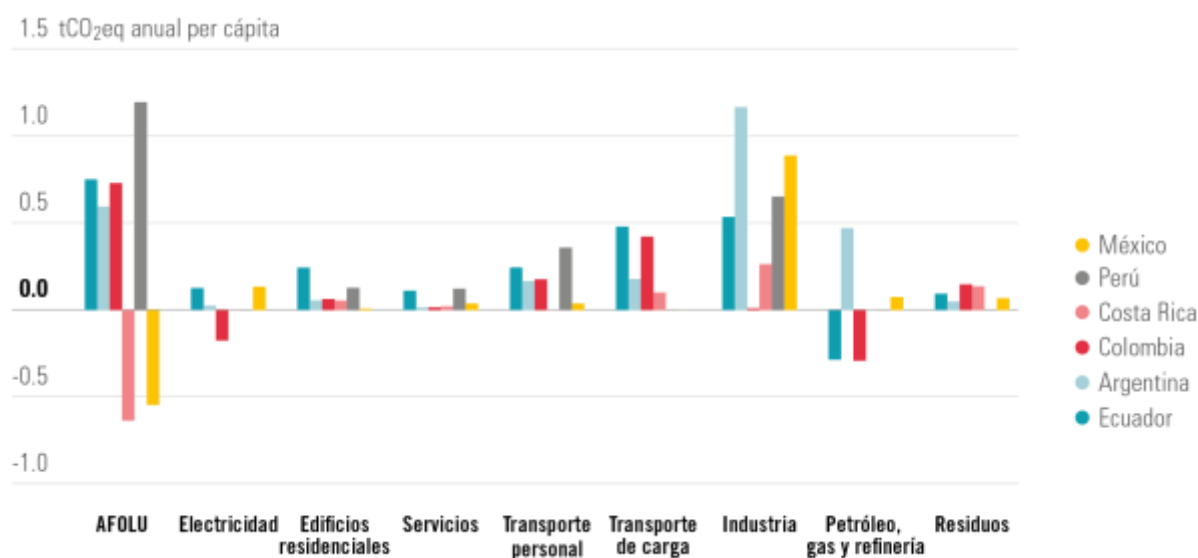


Gráfico 17 Emisiones restantes para el 2050 por sector per cápita (toneladas de CO₂ equivalente per cápita anuales)



Se ha observado en una bibliografía cada vez más amplia que existe una clase de sectores "difíciles de reducir", como el transporte de carga, la aviación, el acero, el cemento, los productos químicos y otras industrias pesadas. [8,9,23,24]. Estos resultados se repitieron en este proyecto como emisiones restantes en las DDP de los países. Estudios de investigación adicionales podrían dar prioridad a la proyección de las previsiones de la demanda, la probable producción nacional, las posibles mejoras de la eficiencia de los materiales[25], y cómo descarbonizar la producción o los servicios de uso final en estos sectores [26–29]

en el contexto de ALC. Teniendo en cuenta las emisiones remanentes en la industria ligera, teniendo en cuenta también la capacidad de electrificación, el uso de residuos o de calor solar, las bombas de calor, y las sustituciones de gas natural (p. ej., biogás, biometano o hidrógeno) en este sector, se justifica la realización de nuevos estudios de investigación a fin de incluir estas opciones en los modelos.

Los equipos de Colombia y Ecuador utilizaron principalmente el procesamiento de biomasa y la captura y almacenamiento de carbono para generar emisiones negativas, mientras que el equipo de Ecuador utilizó la biomasa y la captura y almacenamiento de carbono para la generación de electricidad.

Un efecto positivo de nuestros resultados de DDP es la relativamente pequeña producción de petróleo y gas restante y las emisiones de refinería. Las emisiones de petróleo y gas forman una gran parte de los inventarios actuales[22] y su nivel relativamente modesto en las DDP, que son el primer análisis de muchos de nuestros equipos, constituye un avance positivo. El escenario utilizado para Argentina tiene una producción de gas significativa de las reservas del yacimiento Vaca Muerta; mientras que otros escenarios producidos por el equipo de Argentina y discutidos en su documento de edición especial no la tienen. Sin embargo, la reducción de los ingresos del petróleo y el gas tendrá consecuencias fiscales para varios de nuestros países de América Latina y el Caribe.

4 Discusión

4.1 Diseño de paquetes de políticas nacionales y cooperación internacional

El contraste entre la primera ronda de las NDC y las DDP evidencia la necesidad de que los gobiernos y las partes interesadas conciban y planifiquen paquetes de políticas que lleven la evolución a largo plazo de nuestros países de ALC de una ruta orientada a los combustibles fósiles hacia una que se dirija a cero emisiones netas posteriormente en este siglo. Aunque gran parte del poder y la capacidad para hacer esto reside en los propios países, la naturaleza física de las transformaciones sectoriales esbozadas en nuestras DDP ha demostrado que existe un amplio margen para la cooperación internacional a fin de reducir a cero las emisiones de GEI en América Latina, y en los países en desarrollo en general.

4.1.1 Transporte

Los resultados en materia de transporte de pasajeros en la mayoría de las DDP mostraron una transición bastante exitosa hacia el transporte con baja emisión de carbono. Esto se logró gracias a diferentes combinaciones de planificación urbana, al cambio de modo de transporte habilitado por la construcción de infraestructura y medios de transporte, a la electrificación de autobuses y vehículos para el transporte de pasajeros, y al uso de combustibles líquidos alternativos de cero emisiones netas (p. ej., biodiésel y etanol sostenibles). Cerca de la mitad de las DDP también se ocuparon acertadamente del transporte de carga a través de la electrificación, el cambio de modo y las alternativas para diésel fósil.

Ya se están planificando inversiones sustanciales en transporte a medida que los países de ALC se urbanizan y la población crece. Una iniciativa clave en la política consistirá en transferir gran parte de esa inversión a la planificación urbana y al transporte de mayor capacidad con emisiones bajas y nulas, en lugar de a vehículos de gasolina de menor ocupación. Si bien la planificación urbana y la construcción de infraestructura están bajo el control de los gobiernos nacionales, estatales y locales de acuerdo con sus

capacidades de gestión y financieras, es posible que algunas naciones y regiones requieran asistencia para llevar a cabo una planificación urbana y construcción de infraestructura de última generación, de mayor densidad, de alto tránsito y de movilidad no motorizada. Es posible que también necesiten asistencia de capitales públicos con condiciones favorables para facilitar el levantamiento de capital privado para tránsito urbano de capital intensivo. Perú en particular podría requerir asistencia para la planificación, construcción y el financiamiento del metro de Lima, que según proyecciones sustituirá a 4 millones de vehículos de pasajeros.

La electrificación total de los nuevos autobuses y vehículos privados requerirá que estas tecnologías se conviertan en la nueva norma regulada para el uso del transporte. Esto solo ocurrirá si se hace a escala mundial dado el carácter interrelacionado de la industria de transporte mundial y las economías de escala necesarias para que los vehículos a batería y con pilas de combustible sean asequibles.

Pese a que probablemente los autobuses y los automóviles eléctricos ya son más baratos que sus contrapartes fósiles en base al ciclo de vida, y a que, dependiendo de lo que ocurra con los costos de la batería, pueden llegar a ser más baratos que las versiones de gasolina y diésel en base al gasto inicial, actualmente cuesta más comprarlos. Se necesitan políticas para abordar este asunto que incluyan financiamiento de bajo costo para flotas de autobuses, subsidios específicos y decrecientes, normativas de desempeño de la intensidad de GEI que se ajusten a los esfuerzos mundiales, y construcción de redes de recarga.[30]

Las ciudades de ALC también pueden requerir ayuda para orientar al sector privado en la planificación e implementación de redes de recarga de electricidad y de combustibles alternativos. Esto, tanto por razones de equidad como para garantizar que dichas redes no solo abarquen todos los sectores de las ciudades sino también de los países. Por último, los subsidios para el transporte de combustibles fósiles tendrán que reducirse y finalmente eliminarse tan rápido como lo permita la política interna.

Descarbonizar el transporte, los edificios pequeños y grandes, y la industria ligera requiere grandes cantidades de electricidad limpia en nuestras DDP, la cual proviene de varios mixes de energía eólica, solar, hidroeléctrica, nuclear y biomasa con captura y almacenamiento de carbono. Aumentar la producción de electricidad limpia en +182%-425% como se muestra en nuestras DDP requerirá una adquisición eficiente y de bajo costo, redes de distribución asociadas y una mayor capacidad de instalación nacional para todas las partes de la cadena de suministro.

La generación de electricidad y la construcción de redes de distribución requerirán una dirección política clara tanto para la producción como para la intensidad de GEI. La señal de salida puede ser proporcionada por la planificación estándar de electricidad y por los procesos de mercado combinados con las intenciones y políticas gubernamentales declaradas para electrificar el transporte, los edificios y la industria ligera. La intensidad de GEI de la señal de generación puede variar, pero es probable que sea proporcionada por estructuras reglamentarias y de planificación sólidas y eficaces orientadas a la construcción, principalmente de redes de distribución asociadas y de una generación baja y nula de GEI, p. ej., normas de cartera para las fuentes de energía renovable, o requisitos sencillos de que toda nueva generación sea de emisiones muy bajas o nulas, a menos que se trate de equilibrar las energías renovables variables.

Todo lo anterior requerirá estructuras de mercado eficientes que ofrezcan a los consumidores orientaciones apropiadas sobre la fijación de los precios mínimos y promedio, y proporcionen los medios para amortizar el capital invertido, ya sea a través de hogares, edificios e industria con capacidad de autogeneración o a través de servicios de energía convencionales. Nuestros países de ALC se podrían beneficiar, por un lado, de la asistencia de regiones y empresas de servicios públicos de todo el mundo que han integrado a sus redes niveles más altos (i.e., >10%) de energía solar y eólica, manteniendo a la vez la estabilidad y fiabilidad del sistema a un costo bajo, y, por el otro, de la forma de utilizar los activos existentes (p. ej., los embalses hidroeléctricos) y los recursos para hacerlo.

La inversión en infraestructura de transporte y energía, la reducción de los ingresos de petróleo y gas, y la disminución de los subsidios para el uso de combustibles fósiles tendrán importantes repercusiones combinadas a nivel municipal, regional y nacional en la recaudación pública. Los flujos financieros netos del gobierno también deben considerarse como parte del proceso de planificación nacional. Será necesario considerar una reforma fiscal a largo plazo hacia estructuras de incentivos que fomenten la innovación, el empleo, la inversión y la limitación de las emisiones de GEI, al mismo tiempo que se mantiene la recaudación pública a fin de proporcionar bienes públicos. No se incluyó este análisis de reforma fiscal en el proyecto DDPLAC, pero se recomienda explorar esta dinámica en futuros estudios.

El sector de AFOLU tiene quizás el mayor alcance para la cooperación internacional que se extiende más allá de los actuales canales de los bancos multilaterales de desarrollo basados en el mercado y las finanzas. Todos nuestros países participantes presentan flujos relativamente grandes de deforestación, forestación y agricultura en comparación con sus poblaciones. También presentan un potencial muy grande para reducir los flujos positivos (p. ej., reducir la deforestación) y aumentar los flujos negativos (p. ej., aumentar la forestación, reducir el uso de fertilizantes, ampliar las mejores prácticas, diversificar los monocultivos actuales, aumentar los sumideros de carbono del suelo, etc.). Estos flujos son el resultado del comportamiento de millones de individuos, familias y unidades empresariales, muchos de los cuales no tienen asegurada la tenencia de la tierra o la capacidad de hacer cumplir sus derechos de tenencia y uso, etc., lo que lleva a una toma de decisiones muy orientada al corto plazo (p. ej., la agricultura de tala y quema de baja productividad).

Las prácticas para reducir las emisiones, como son la reducción de la deforestación, el aumento de la forestación y otras, también se ven dificultadas por la minería ilegal, la agricultura, la silvicultura, el fin de la guerra de guerrillas en el caso de Colombia (donde paradójicamente la insurrección civil redujo la deforestación al negar el acceso a la tierra a aquellos con intención de deforestarla), y la deforestación ilegal para la cría de ganado, etc. Por ejemplo, en Brasil la deforestación es principalmente el resultado secuencial de pequeños aparceros que dejan pastar su ganado en tierras forestales del gobierno para establecer "derechos de ocupantes ilegales" y una vez establecidos estos derechos, venden la tierra a empresas agrícolas más grandes [31]. Durante muchos años Brasil logró ralentizar y detener este proceso mediante el uso de policías desarmados o ligeramente armados. Pero una vez que estos policías fueron retirados de la zona, el proceso de deforestación se reanudó.

En Ecuador y Perú, la deforestación es el resultado de la recurrencia a la agricultura de tala y quema de muy baja productividad por parte de agricultores de subsistencia con tenencia inestable. En el caso de Ecuador, la deforestación se ve acelerada por la construcción de carreteras para la extracción de gas y

petróleo en la Amazonía. Si se pudieran mejorar las competencias laborales de estos agricultores de subsistencia y se les pudiera garantizar un empleo mejor remunerado, la deforestación podría ralentizarse.

En el pasado, las políticas basadas en instituir y hacer respetar la tenencia de la tierra (p. ej., en Ecuador, Brasil y Perú) han tenido éxito en la reducción de la deforestación, el aumento de la forestación y el apoyo a la agricultura eficiente y sostenible. Se necesita una evaluación cuidadosa de la forma en que este tipo de políticas pueden ser alentadas y apoyadas en el ámbito nacional e internacional. Esto debería ser un aspecto clave para futuros estudios.

Por último, el documento de edición especial de Perú señaló que existe una gran oportunidad, que va más allá de los recursos financieros nacionales del Gobierno peruano, para que mediante la forestación comercial a gran escala se produzcan emisiones negativas, se mejore la biodiversidad y, quizás lo más importante, se ayude a estabilizar el tamaño de la Amazonía a una escala lo suficientemente grande como para mantener sus condiciones hidrológicas únicas y autosostenibles.[32]

El Informe Especial del IPCC sobre el objetivo de 1,5 °C indica que se necesitarán grandes emisiones negativas a escala de gigatoneladas (hasta 3,6 GtC anuales del uso del suelo en 2050, y hasta 5,0 GtC anuales de biomasa con CCS) de las tecnologías de uso del suelo y de emisiones negativas que aumentarán con el tiempo[2].

Tal como está establecido actualmente, el régimen de gobernanza climática internacional ofrece muy pocos incentivos para que un país con grandes flujos de carbono bajo su gestión provea sumideros de carbono globales. Los incentivos son muy poderosos para contabilizar estos flujos en el inventario nacional y utilizarlos para reducir o ralentizar la necesidad de reducir las emisiones del sistema energético a cero emisiones netas. Esto tiene importantes implicaciones a largo plazo para las regiones con capacidad de tener emisiones netas negativas (p. ej., las que tienen un importante potencial de uso del suelo como sumidero, como América Latina). La pregunta que surge aquí es ¿las regiones utilizan esta capacidad en su propio beneficio para equilibrar sus emisiones con fines de crecimiento, o transfieren esas emisiones negativas, que probablemente serán necesarias para alcanzar objetivos ambiciosos en materia de temperatura, a un “fondo” mundial en el contexto de su soberanía? No pretendemos ofrecer una respuesta a este interrogante, sino más bien aportar evidencia de la importancia de proporcionar una estructura de incentivos sólida y eficaz para que los países de ALC asignen sus emisiones negativas al sumidero mundial, a la vez que reducen a cero las emisiones de su sistema energético.

4.2 Lecciones aprendidas para futuros procesos similares a las DDP

En primer lugar, los equipos lograron beneficiarse en gran medida de la revisión conjunta de sus resultados en el cuarto taller realizado en Quito, después de toda la construcción de modelos y creación de escenarios. Probablemente, plantear un enfoque iterativo a más largo plazo y con mayores oportunidades de revisión conjunta, hubiese podido resultar provechoso.

En segundo lugar, pese a que inicialmente este proyecto solo estaba destinado a centrarse en la oferta y la demanda de energía, el predominio del sector de AFOLU en los inventarios nacionales de los países de ALC alentó un replanteamiento de las prioridades hacia una combinación entre la oferta y la demanda de energía y las emisiones del sector de AFOLU. Podría haberse dado una transición más fácil si al principio

se hubiera realizado un taller más largo dirigido a revisar las prioridades regionales en un mundo que cumple con lo establecido en el Acuerdo de París.

Por último, la diversidad de las estrategias nacionales, consideradas en su conjunto, ilustra la amplitud de las opciones disponibles para la descarbonización. El siguiente paso prioritario de nuestro programa de investigación será considerar más sistemáticamente todas las diferentes opciones en el contexto de cada país. Esto sirve tanto para investigar estrategias más sólidas como para explorar las posibilidades de hacer recortes más profundos.

5 Conclusión

El proyecto DDPLAC ha demostrado que se pueden desarrollar rutas para que los países de ALC alcancen un nivel de cero emisiones netas de GEI, al tiempo que se benefician, entre otras ventajas, del crecimiento económico, la mejora de la calidad del aire, y un transporte de menor costo y de mayor calidad. La puesta en práctica de estas rutas requerirá paquetes de políticas nacionales y sectoriales diseñadas para evolucionar a medida que se cuenta con más información, y que aborden todas las emisiones y los objetivos de desarrollo, teniendo en cuenta las necesidades y circunstancias de la región. Los resultados presentados en este documento, detallados a nivel sectorial y explícitos en el contenido de las transformaciones sectoriales físicas, pueden aportar orientación en materia de políticas para los debates nacionales sobre la transición. También pueden servir como fuente de información para las estrategias a largo plazo de estos países, la revisión de sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional ante la CMNUCC, y la formación de políticas a corto y largo plazo.

6 Apéndice sobre LMDI

Nuestro análisis de descomposición comienza con una identidad que tiene en cuenta cuatro factores genéricos (actividad general, intensidad de uso final por unidad de actividad, intensidad de energía por unidad de uso final, e intensidad de GEI de los combustibles por unidad de energía) que influyen en las emisiones de CO₂ del consumo de combustibles fósiles (Ecuación 1).[21]

$$(1) \ C = \sum \left(Activity \cdot \frac{SectorEU}{Activity} \cdot \frac{Energy}{SectorEU} \cdot \frac{GHG}{Energy} \right) = \sum (A \cdot EU \cdot EE \cdot G)$$

En donde:

C = Emisiones de CO₂

Actividad = Actividad o PIB del sector. Utilizamos la población en el caso del transporte de pasajeros y residencias (hogares para Argentina), y el PIB en el caso de los sectores de servicios y transporte de carga.

SectorEU = Demanda sectorial de uso final por unidad de actividad global (pkm/pob para el transporte de pasajeros, m² per cápita para los hogares, tkm/USD-PIB para carga, ninguno para servicios)

Energía = Consumo de energía por demanda de uso final del sector

GEI = Emisiones de GEI por sector

Para comparar las emisiones de CO₂ en 2050 y 2015 Ecuación 1:

$$(2) \ \Delta C = C_{2050} - C_{2015}$$

$$(3) \Delta C = \sum(A \cdot EU \cdot EE \cdot G)_{2050} - \sum(A \cdot EU \cdot EE \cdot G)_{2015}$$

$$(4) \Delta C = \Delta A + \Delta EU + \Delta EE + \Delta G$$

En donde:

ΔC = Diferencia en las emisiones totales de CO₂ entre la región *c* y la región *m*

$\Delta C_{Activity}$ = Diferencia debida a las actividades

$\Delta C_{EndUseInt}$ = Diferencia debida a la demanda de uso final por unidad de actividad, es decir, la "intensidad" de uso final

$\Delta C_{EnergyEff}$ = Diferencia debida a la demanda de energía por cada unidad de demanda de uso final

$\Delta C_{FuelGHGInt}$ = Diferencia debida a la intensidad de GEI de los combustibles por unidad de demanda de energía

Utilizamos el método LMDI I para calcular los subcomponentes de la Ecuación 4 en las Ecuaciones 5-11 porque es fácil de usar, robusto, y no tiene término residual ($\Delta C_{Res} = 0$):

$$(5) \Delta C_{Activity} = \sum \frac{C_{2050} - C_{2015}}{\ln(C_{2050})} \cdot \ln\left(\frac{Activity_{2050}}{Activity_{2015}}\right)$$

$$(6) \Delta C_{EndUseInt} = \sum \frac{C_{2050} - C_{2015}}{\ln(C_{2050})} \cdot \ln\left(\frac{EndUseInt_{2050}}{EndUseInt_{2015}}\right)$$

$$(7) \Delta C_{EnergyEff} = \sum \frac{C_{2050} - C_{2015}}{\ln(C_{2050})} \cdot \ln\left(\frac{EnergyEff_{2050}}{EnergyEff_{2015}}\right)$$

$$(8) \Delta C_{FuelGHGInt} = \sum \frac{C_{2050} - C_{2015}}{\ln(C_{2050})} \cdot \ln\left(\frac{FuelGHGInt_{2050}}{FuelGHGInt_{2015}}\right)$$

El primer término en cada una de las ecuaciones es la media logarítmica de la diferencia en las emisiones de CO₂ entre 2015 y 2050. Este valor se multiplica por el logaritmo natural de la relación del factor en cuestión, p. ej., la relación de la actividad del 2015 con la del 2050, a fin de calcular la influencia de ese factor en la diferencia de CO₂ per cápita entre los períodos de tiempo.

7 Agradecimientos

El proyecto DDPLAC es financiado por el fondo Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático del BID (RG-T3028), el Fondo Climático Francés del BID (RG-T3193), la Plataforma Rutas 2050, y la Agencia Francesa para el Desarrollo (AFD). Los autores agradecen y reconocen a Ivan Pharabod por el diseño de los gráficos. IDDRI reconoce con gratitud el apoyo continuo de la Agencia Nacional de Investigación de Francia, Beca número ANR-10-LABX-14-01.

Este documento fue traducido al español por Adriana Cantor, con insumos de Ana Iju y Scarleth Núñez Castillo. La versión original, en inglés, se publicó como [37].

8 Referencias

- [1] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J. Minx, Editors, IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of

- Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2014, Cambridge University Press, Cambridge, 2014.
<http://www.ipcc.ch/index.htm>.
- [2] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield, IPCC Special Report: Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
 - [3] M. Fay, S. Hallegatte, A. Vogt-Schilb, J. Rozenberg, U. Narloch, T.T. Kerr, Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future., World Bank Group. XXXIII (2015) 81–87.
<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
 - [4] H. Waisman, C. Bataille, H. Winkler, F. Jotzo, P. Shukla, M. Colombier, G. Anandarajah, R. Boer, Y. Cho, P. Criqui, A. Denis-Ryan, S. Dhar, M. Fischedick, M. Gaeta, C. Gesteira, B. Haley, J.-C. Hourcade, M. Kainuma, E.L. La Rovere, Q. Liu, O. Lugovoy, T. Masui, S. Mathy, K. Oshiro, R. Parrado, M. Pathak, V. Patshnikov, S. Pye, G. Safonov, S. Samadi, D. Sawyer, U. Siagian, T. Spencer, F. Teng, J. Tovilla, H. Trollip, M.-R. Virdis, J. Williams, S. Young, A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies , Nature Climate Change. 9 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0442-8>.
 - [5] C. Bataille, H. Waisman, M. Colombier, L. Segafredo, J. Williams, F. Jotzo, The need for national deep decarbonization pathways for effective climate policy, Climate Policy. 16 (2016) S7–S26.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1173005>.
 - [6] C. Bataille, H. Waisman, M. Colombier, L. Segafredo, J. Williams, The Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP): insights and emerging issues, Climate Policy. 16 (2016) S1–S6.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1179620>.
 - [7] L. Clarke, K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Löschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P.R. Shukla, M. Tavoni, B.C.C. van der Zwaan, D.P. van Vuuren, IPCC AR5 Chapter 5: Assessing Transformation Pathways, in: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, V. Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx (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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014: pp. 413–510.
 - [8] S.J. Davis, N.S. Lewis, M. Shaner, S. Aggarwal, D. Arent, I.L. Azevedo, S.M. Benson, T. Bradley, J. Brouwer, Y.-M. Chiang, C.T.M. Clack, A. Cohen, S. Doig, J. Edmonds, P. Fennell, C.B. Field, B. Hannegan, B.-M. Hodge, M.I. Hoffert, E. Ingersoll, P. Jaramillo, K.S. Lackner, K.J. Mach, M. Mastrandrea, J. Ogden, F. Peterson, D.L. Sanchez, D. Sperling, J. Stagner, J.E. Trancik, C.-J. Yang, K. Caldeira, Net-zero emissions energy systems, Science. 9793 (2018).
<https://doi.org/10.1126/science.aas9793>.
 - [9] C. Bataille, Physical and policy pathways to net-zero emissions industry, WIREs Wiley Interdisciplinary Reviews. (2019) 1–20. <https://doi.org/10.1002/wcc.633>.
 - [10] A. Grubler, C. Wilson, N. Bento, B. Boza-Kiss, V. Krey, D.L. McCollum, N.D. Rao, K. Riahi, J. Rogelj, S. Stercke, J. Cullen, S. Frank, O. Fricko, F. Guo, M. Gidden, P. Havlík, D. Huppmann, G. Kiesewetter, P. Rafaj, W. Schoepp, H. Valin, A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies, Nature Energy. 3 (2018) 515. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>.
 - [11] G. Iyer, C. Ledna, L. Clarke, J. Edmonds, H. McJeon, P. Kyle, J.H. Williams, Measuring progress from nationally determined contributions to mid-century strategies, Nature Climate Change. 7

- (2017) 871–874. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0005-9>.
- [12] A. Vogt-Schilb, S. Hallegatte, C. de Gouvello, Marginal abatement cost curves and the quality of emission reductions: a case study on Brazil, *Climate Policy*. 15 (2015) 703–723. <https://doi.org/10.1080/14693062.2014.953908>.
- [13] A. Vogt-Schilb, G. Meunier, S. Hallegatte, When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment, *Journal of Environmental Economics and Management*. 88 (2018) 210–233. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.12.001>.
- [14] S. Pye, C. Bataille, Improving deep decarbonization modelling capacity for developed and developing country contexts, *Climate Policy*. 16 (2016). <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1173004>.
- [15] E. Kriegler, C. Bertram, T. Kuramochi, M. Jakob, M. Pehl, M. Stevanović, N. Höhne, G. Luderer, J.C. Minx, H. Fekete, J. Hilaire, L. Luna, A. Popp, J.C. Steckel, S. Sterl, A.W. Yalew, J.P. Dietrich, O. Edenhofer, Short term policies to keep the door open for Paris climate goals, *Environmental Research Letters*. 13 (2018). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac4f1>.
- [16] H. Benveniste, O. Boucher, C. Guivarch, H. Le Treut, P. Criqui, Impacts of nationally determined contributions on 2030 global greenhouse gas emissions: Uncertainty analysis and distribution of emissions, *Environmental Research Letters*. 13 (2018). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa0b9>.
- [17] R. Boyd, J. Turner, B. Ward, Intended nationally determined contributions: what are the implications for greenhouse gas emissions in 2030?, (2015) 42. <http://eprints.lse.ac.uk/64525/>.
- [18] M. Binsted, G. Iyer, J. Edmonds, A. Vogt-Schilb, R. Arguello, A. Cadena, R. Delgado, F. Feijoo, A.F.P. Lucena, H. McJeon, F. Miralles-Wilhelm, A. Sharma, Stranded asset implications of the Paris Agreement in Latin America and the Caribbean, *Environmental Research Letters*. (2019) 0–18.
- [19] N.A. Sepulveda, J.D. Jenkins, F.J. de Sisternes, R.K. Lester, The Role of Firm Low-Carbon Electricity Resources in Deep Decarbonization of Power Generation, *Joule*. 2 (2018) 2403–2420. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.006>.
- [20] C. Bataille, N. Rivers, P. Mau, C. Joseph, J.-J. Tu, How malleable are the greenhouse gas emission intensities of the G7 nations?, *Energy Journal*. 28 (2007).
- [21] B.W. Ang, The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide, *Energy Policy*. 33 (2005) 867–871. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.010>.
- [22] B. Solano-Rodriguez, S. Pye, P.-H. Li, P. Ekins, O. Manzano, A. Vogt-Schilb, Implications of climate targets on oil production and fiscal revenues in Latin America and the Caribbean, (2019) 24. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0001802>.
- [23] Energy Transitions Commission, Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century, (2018). http://www.energy-transitions.org/sites/default/files/ETC_MissionPossible_FullReport.pdf.
- [24] C. Bataille, M. Åhman, K. Neuhoﬀ, L. Nilsson, M. Fischedick, S. Lechtenböhmer, B. Solano-Rodriguez, A. Denis-Ryan, S. Steiber, H. Waisman, O. Sartor, S. Rahbar, K. Neuhoﬀ, L.J.L.J. Nilsson, B. Solano-Rodriguez, A. Denis-Ryan, S. Steibert, H. Waisman, O. Sartor, S. Rahbar, A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement, *Journal of Cleaner Production*. 187 (2018) 960–973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>.
- [25] International Energy Agency (IEA), Material efficiency in clean energy transitions, (2019). <https://doi.org/10.1787/aeaaccd8-en>.
- [26] C. Bataille, Low and zero emissions in the steel and cement industries: Barriers, technologies and policies., *OECD Green Growth and Sustainable Development Forum*. (2019).
- [27] V. Vogl, M. Åhman, L.J. Nilsson, Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free

- steelmaking, *Journal of Cleaner Production*. 203 (2018) 736–745.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>.
- [28] M. Fishedick, J. Marzinkowski, P. Winzer, M. Weigel, Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies, *Journal of Cleaner Production*. 84 (2014) 563–580.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>.
- [29] A.M. Bazzanella, F. Ausfelder, Technology study: Low carbon energy and feedstock for the European Chemical Industry, Dechema: Gesellschaft Für Chemische Technik Und Biotechnologie e.V. (2017).
https://dechema.de/dechema_media/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry-p-20002750.pdf.
- [30] J. Quiros-Tortos, L. Victor-Gallardo, L. Ochoa, Electric Vehicles in Latin America: Slowly but Surely Toward a Clean Transport, *IEEE Electrification Magazine*. 7 (2019) 22–32.
<https://doi.org/10.1109/MELE.2019.2908791>.
- [31] P.R.R. Rochedo, B. Soares-Filho, R. Schaeffer, E. Viola, A. Szklo, A.F.P. Lucena, A. Koberle, J.L. Davis, R. Rajão, R. Rathmann, The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil, *Nature Climate Change*. 8 (2018) 695–698. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0213-y>.
- [32] T.E. Lovejoy, C. Nobre, Amazon tipping point, *Science Advances*. 4 (2018) 1–2.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2340>.
- [33] R. Boer, G. Immanuel, S. Thoha, M. Ardiansyah, A. Parulian, R.A. Sugardiman, B.A. Margono, U.W.R. Siagian, R.G. Dewi, Pathways to deep decarbonizing agriculture, forest and other land-uses sector in Indonesia, (2016). http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2017/02/DDPP_AFOLU_ID.pdf (accessed April 20, 2017).
- [34] A. Denis, F. Jotzo, S. Ferraro, A. Jones, N. Kautto, R. Kelly, A. Skarbek, J. Thwaites, Pathways to deep decarbonisation in 2050: how Australia can prosper in a low carbon world, (2014). http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/AU_DDPP_Report_Final.pdf.
- [35] E. Lèbre La Rovere, C. Gesteira, C. Grottera, W. Wills, Pathways to deep decarbonization in Brazil, (2015). http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/12/DDPP_BRA.pdf (accessed April 19, 2017).
- [36] BID, DDPLAC (2019). Cómo Llegar a Cero Emisiones Netas: Lecciones de América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo <https://doi.org/10.18235/0002024>
- [37] Bataille, C., Waisman, H., Briand, Y., Svensson, J., Vogt-Schilb, A., Jaramillo, M., Delgado, R., Arguello, R., Clarke, L., Wild, T., Lallana, F., Bravo, G., Nadal, G., Le Treut, G., Godinez, G., Quiros-Tortos, J., Pereira, E., Howells, M., Buira, D., Tovilla, J., Farbes, J., Ryan, J., De La Torre Ugarte, D., Collado, M., Requejo, F., Gomez, X., Soria, R., Villamar, D., Rochedo, P., Imperio, M., 2020. Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities. *Energy Strategy Reviews* 30, 100510. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100510>
- [38] Saget, C., Vogt-Schilb, A., Luu, T., 2020. El empleo en un futuro de cero emisiones netas en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de desarrollo y organizacion internacional del trabajo. <http://dx.doi.org/10.18235/0002509>