

Soluciones basadas en la naturaleza y remoción de dióxido de carbono

Joseluis Samaniego | Santiago Lorenzo | Estefani Rondón Toro
Luiz Fernando Krieger Merico | Juan Herrera Jiménez
Paul Rouse | Nicholas Harrison



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Euroclima+



Financiado por la Unión Europea

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

Deseo registrarme



NACIONES UNIDAS

CEPAL



www.cepal.org/es/publications



www.instagram.com/publicacionesdelacepal



www.facebook.com/publicacionesdelacepal



www.issuu.com/publicacionescepal/stacks



www.cepal.org/es/publicaciones/apps

Soluciones basadas en la naturaleza y remoción de dióxido de carbono

Joseluis Samaniego
Santiago Lorenzo
Estefani Rondón Toro
Luiz Fernando Krieger Merico
Juan Herrera Jiménez
Paul Rouse
Nicholas Harrison



Financiado por
la Unión Europea

Este documento fue preparado por Joseluis Samaniego, Director de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL); Santiago Lorenzo, Jefe de la Unidad de Economía del Cambio Climático; Estefani Rondón, Asistente de Investigación; Juan Herrera Jiménez, Consultor, y Luiz Fernando Krieger Merico, Oficial de Asuntos Económicos de la Unidad de Políticas para el Desarrollo Sostenible, todos de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL, y Paul Rouse y Nicholas Harrison, ambos de la Carnegie Climate Governance Initiative (C2G). El documento, elaborado en el marco del programa EUROCLIMA+, fue supervisado por Joseluis Samaniego y coordinado por Santiago Lorenzo y Estefani Rondón Toro.

Los autores agradecen a Kai-Uwe Schmidt y Alia Hassan, de C2G, y a Daniela Navarro González por sus contribuciones al documento.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de las Naciones Unidas o las de los países que representa.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2022/224
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2022
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.22-01074

Esta publicación debe citarse como: J. Samaniego y otros., "Soluciones basadas en la naturaleza y remoción de dióxido de carbono", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/224), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	7
Introducción	9
I. Metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y las Contribuciones Nacionalmente Determinadas. El problema de la insuficiencia y las metas climáticas globales	13
A. Acuerdo de París y los compromisos nacionales para alcanzar las metas climáticas	13
B. Las NDC, el principal mecanismo para construir planes vinculantes y cumplir con las metas globales	14
C. La ambición de las metas nacionales y el problema de la insuficiencia	15
D. El problema del cambio climático y los compromisos nacionales en América Latina y el Caribe	17
1. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y las NDC	21
2. Medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono (RDC) y las NDC.....	21
II. Las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono y su importancia para América Latina y el Caribe: panorama regional, retos y oportunidades	23
III. El problema de la degradación de los suelos y la desertificación. La deforestación: el contexto global centrado en América Latina y el Caribe	27
A. El estado de los bosques en América Latina y el Caribe	28
B. Degradación de tierras	31
C. Una recuperación económica post-pandemia resiliente y de bajo carbono	35
IV. Medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono: técnicas y fundamentos	39
A. Contexto general sobre las RDC	39
B. ¿Por qué se debería discutir sobre el despliegue de las RDC?	40
C. Forestación y reforestación	46
D. Afloramiento artificial del océano	47
E. Producción y depósito de biocarbón	48
F. Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono	48

G.	Secuestro de carbono en suelos.....	49
H.	Secuestro en océanos de carbono de residuos de cultivos.....	50
I.	Captura directa de dióxido de carbono del aire y almacenamiento	51
J.	Mejora de la alcalinidad del océano	52
K.	Meteorización terrestre reforzada	53
L.	Cultivo de macroalgas para secuestro.....	54
M.	Captura y almacenamiento de carbono en el océano	55
N.	Fertilización de los océanos con hierro (FOH)	55
O.	Fertilización de los océanos con macronutrientes, nitrógeno y fósforo (FOM)	56
P.	Recuperación de turberas, humedales y hábitats costeros.....	56
V.	Gobernanza de las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono para su consideración global.....	59
A.	Gobernanza de la investigación	59
B.	Monitoreo, reporte y verificación.....	60
C.	“Riesgo moral” o “disuasión de mitigación”	60
D.	Compensaciones riesgo-riesgo	61
E.	Posibles implicaciones de las medidas y tecnologías de RDC para los Objetivos de Desarrollo Sostenible	61
F.	Incentivos.....	62
G.	Secuestro y permanencia	62
VI.	Caso de estudio: impacto de las medidas y/o tecnologías de remoción de dióxido de carbono sobre los objetivos de desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe	63
VII.	Conclusiones	71
	Bibliografía	73

Cuadros

Cuadro 1	Distribución sectorial de las medidas de mitigación y adaptación en la CDN. Sectores incluidos en las CDN para los países que presentaron su plan actualizado	19
Cuadro 2	Datos de biodiversidad en América Latina y el Caribe	24
Cuadro 3	Degradación de tierras en países seleccionados como porcentaje del territorio y sus factores de degradación.....	33
Cuadro 4	Personas que viven en tierras agrícolas degradadas (TAD) como porcentajes de la población rural	35
Cuadro 5	Resumen de las técnicas de RDC.....	41
Cuadro 6	Estado actual del conocimiento y el desarrollo en Argentina y Colombia.....	64
Cuadro 7	Resultados principales de las medidas y/o tecnologías de RDC estudiadas	64
Cuadro 8	Argentina: impacto del despliegue de RDC en indicadores clave	65
Cuadro 9	Colombia: impacto del despliegue de RDC en indicadores clave	66

Gráficos

Gráfico 1	Estado de las NDC en América Latina y el Caribe.....	15
Gráfico 2	Emisiones de CO ₂ proyectadas ante la implementación de las NDC actualizadas	16
Gráfico 3	América Latina y el Caribe: evolución de la superficie cultivada de soya	29
Gráfico 4	América Latina y el Caribe: evolución de la cobertura forestal.....	29

Gráfico 5	Monitoreo de la deforestación del Bosque Amazónico del Brasil por el satélite: tasa PRODES Amazonía, 2012-2020	31
Gráfico 6	Carbono secuestrado en distintos sistemas de producción de bovinos de corte en Brasil	34
Recuadros		
Recuadro 1	NDC LAC	18
Recuadro 2	La restauración de manglares como herramienta de adaptación en los ecosistemas costeros	24
Diagramas		
Diagrama 1	Sugerencia de despliegue a gran escala de opciones de RDC por fases en países de América Latina y el Caribe	25
Diagrama 2	Consideraciones y limitaciones para abordar las medidas de RDC en América Latina y el Caribe	68
Imagen		
Imagen 1	Gobernanza de las medidas y tecnologías de RDC, un resumen de la agenda clave de gobernanza y las técnicas de RDC	60

Resumen

Los impactos negativos del cambio climático exigen una respuesta global urgente para mitigar las emisiones y fortalecer la capacidad adaptativa de nuestras estructuras sociales, económicas y ambientales. En América Latina y el Caribe (ALC), dentro de un contexto de alta vulnerabilidad y con la presencia de tres crisis que afectan de forma simultánea a la región, es necesaria una transformación de los modelos de desarrollo, que conduzca hacia una transición sostenible. En el proceso, las políticas nacionales y locales deben ser capaces de aprovechar al máximo el potencial de la acción climática, a través de la adopción de nuevas tecnologías, la innovación, la reorganización productiva y la identificación de sinergias. Por esta razón, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono (RDC) cobran especial relevancia, como complemento para el cumplimiento de las metas climáticas. Bajo este escenario, el presente documento examina las oportunidades y retos de la implementación a gran escala de estas medidas en la región de ALC, haciendo énfasis en la necesidad de acelerar los esfuerzos ya realizados, ampliar la frontera de investigación y gestionar los riesgos. Los resultados permiten reconocer las limitaciones existentes y los vínculos entre objetivos, políticas y herramientas, así como los co-beneficios para su implementación, que permitan contribuir a un gran impulso para avanzar hacia la sostenibilidad.

Introducción

El cambio climático surge como un problema sin precedentes, con la capacidad de distorsionar las estructuras sociales, económicas y ambientales en todo el mundo. La evidencia científica confirma la magnitud de la crisis y transmite el sentido de urgencia para implementar acciones. Asimismo, ayuda a reconocer la interdependencia entre las variables climáticas, los ecosistemas y las sociedades humanas, revelando así la naturaleza multidimensional del problema. Desde el contexto global y local, esto implica una transformación profunda de los modelos de desarrollo, un proceso de ajuste acelerado y una transición sostenible hacia la descarbonización. Por lo anterior, la política climática se centra en mitigar los efectos potenciales del cambio climático y adaptarse a los riesgos ya materializados, a partir de una visión holística de los problemas.

Ahora bien, la vulnerabilidad climática y socioeconómica determina plenamente el alcance de estos impactos negativos. La variación en los patrones climáticos y la intensificación de fenómenos extremos se comunican con las demás estructuras de forma compleja. El nivel de vulnerabilidad difiere fuertemente entre regiones, personas y ecosistemas. Además, los riesgos se abordan según el contexto y el lugar. En América Latina y el Caribe (ALC), por ejemplo, el cambio climático se inserta en un contexto de bajas emisiones relativas, alta vulnerabilidad climática, desigualdad social y estructuras económicas frágiles, de manera que una de las mayores prioridades de la región es aumentar la resiliencia y fortalecer la capacidad adaptativa.

Ante este escenario, resulta fundamental aprovechar el potencial de la acción climática, la innovación tecnológica y la adaptación basada en ecosistemas. Se hace necesario explorar alternativas oportunas y viables que permitan minimizar los costos socioeconómicos, y abordar las necesidades ambientales más urgentes, considerando las sinergias entre las medidas de mitigación y adaptación, las inequidades sociales y la complementariedad entre políticas.

Con respecto a las sinergias, las medidas que abordan simultáneamente objetivos de mitigación y adaptación constituyen una ventaja comparativa para ALC, y una oportunidad para implementar acciones integrales que permitan proteger a los ecosistemas, reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar el bienestar de las comunidades locales.

Por otra parte, muchos efectos negativos del cambio climático son irreversibles. En estos casos, las medidas de mitigación son insuficientes y cobran especial importancia las políticas de adaptación. Una

vez las variables climáticas sobrepasen los límites planetarios, será necesario recurrir a tecnologías de emisiones negativas y a los sumideros de carbono. En ese sentido, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono (RDC o carbon dioxide removal —CDR— por sus siglas en inglés), aparecen como opciones para aumentar la resiliencia climática en el contexto regional, y para la creación de capacidad adaptativa a partir de los ecosistemas.

Actualmente, las medidas de RDC se encuentran en etapas tempranas del proceso de implementación, y hay mucha incertidumbre sobre sus costos, potenciales beneficios y riesgos, por lo que resulta importante examinar en detalle las consecuencias de su implementación a nivel global y en la región de ALC. Además, se haría necesario crear mecanismos de cooperación internacional para transferir capacidades institucionales, recursos financieros e innovación.

Como antecedente sobre el desarrollo de este tópico, durante el año 2021, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), la Carnegie Climate Governance Initiative (C2G) y la Fundación Torcuato Di Tella (FTDT), llevaron a cabo una investigación para establecer el impacto que tendría la implementación de las medidas y tecnologías de RDC sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la región de ALC (Samaniego et al., 2021). En el estudio fueron identificadas las brechas de conocimiento, para la formulación de recomendaciones, que permitiese a los gobiernos de la región considerar la incorporación de las medidas de RDC en las estrategias nacionales de cambio climático, como, por ejemplo, en las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (CDN o Nationally Determined Contributions —NDC— por sus siglas en inglés).

Con base en el estudio de (Samaniego et al., 2021), se desarrolló posteriormente una herramienta (CEPAL & C2G, 2022) de modelación que incluye cuatro (4) tecnologías de RDC relevantes para la región de ALC, permitiendo estimar los potenciales impactos económicos, sociales y ambientales que las opciones de RDC podrían tener en un determinado país, en particular en lo que concierne a indicadores clave.

En esta oportunidad, el objetivo del presente documento se centra en ampliar la discusión a partir de una reflexión sobre la necesidad de implementar medidas de adaptación basada en ecosistemas para la región de ALC, y las sinergias entre adaptación y mitigación, teniendo como base las medidas identificadas como RDC. Así mismo, se ahonda sobre las metas de reducción de emisiones de GEI, relacionado con el problema de la insuficiencia de las NDCs y las metas climáticas globales, derivando en la importancia que tienen las medidas de RDC en este contexto. Se agrega un caso de estudio sobre el problema de la desertificación en la región, permitiendo evidenciar la necesidad de soluciones para abarcar esta problemática. Se desarrollan las medidas y tecnologías de RDC existentes en la literatura, así como sus implicaciones para la gobernanza.

A partir de un contexto general, la CEPAL viene específicamente trabajando para crear una combinación adecuada de políticas sociales y ambientales, junto con políticas económicas, tecnológicas e industriales, que permita contribuir al desarrollo de ALC. Estas políticas y su combinación se denominan “Gran Impulso para la Sostenibilidad” (CEPAL, 2020), permitiendo aumentar la inversión hacia sectores de alta productividad, sin aumentar la vulnerabilidad en la balanza de pagos y que a su vez generan beneficios para la conservación del medio ambiente, generan empleos, y que provoquen la transformación radical de los patrones de producción y consumo, asegurando que la revolución tecnológica esté también al servicio del nuevo modelo de desarrollo. Con base en este Gran Impulso, se han identificado ocho sectores, que son tecnológicamente maduros e innovadores, que se pueden producir dentro de la región, y que generan co-beneficios, con aportes al empleo y con una menor huella ambiental:

- i) Transformación de la matriz energética con base en energías renovables
- ii) La movilidad sostenible y los espacios urbanos
- iii) La revolución digital para la sostenibilidad
- iv) La industria manufacturera de la salud
- v) La industria de la ciudad

- vi) La bioeconomía y las SbN
- vii) La economía circular
- viii) Turismo sostenible

Dado que las emisiones de la agricultura y ganadería, y el cambio de uso del suelo representan el 42% del total en la región de ALC (Bárcena A., et al., 2021), en esta realidad, las SbN representarían una oportunidad de mitigación. Las SbN también son una herramienta importante para aumentar la capacidad de adaptación de la región, ya que reducen la exposición y la sensibilidad a los impactos del cambio climático. Por ejemplo, la protección, restauración o manejo de bosques naturales y humedales en cuencas hidrográficas puede asegurar y regular el suministro de agua y reducir el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra, así como la erosión del suelo. Así mismo, la restauración de los manglares, entre varios otros servicios ambientales, permite mantener una barrera protectora de las comunidades costeras contra las inundaciones, reduciendo los daños por tormentas y la erosión costera.

De esta forma, las SbN podrían sustituir, complementar o reducir las grandes inversiones en infraestructura intensiva en carbono, al mismo tiempo que son flexibles y fácilmente adaptables a los cambios a largo plazo, como el aumento del nivel del mar, con menores costos de conservación.

Restaurar el patrimonio natural a través de la reforestación es también un paso fundamental hacia la descarbonización de las economías. Estas inversiones son de bajo costo y seguras para almacenar carbono y brindar un servicio global a la humanidad. Además, es una forma efectiva de generar empleo, recuperar servicios ecosistémicos (como el suministro de agua y el uso de la tierra) que son vitales para reducir vulnerabilidades y evitar desastres ecológicos.

El presente documento se organiza en cinco capítulos que describen el contexto de la investigación. En el capítulo I, se describen las metas climáticas globales y los compromisos nacionales derivados del Acuerdo de París, al igual que el contexto regional de mitigación y adaptación y el nivel de ambición de las NDC actuales. En el capítulo II se ahonda sobre cómo se insertan las RDC y su importancia para la región. En el capítulo III, se aborda el problema de la desertificación de los suelos en el contexto global y en ALC. En el capítulo IV se describen las medidas y tecnologías de RDC presentes en la literatura, que cuentan con ciertos niveles de desarrollo o implementación. En este mismo capítulo se presentan algunas agendas de gobernanza sobre las medidas de RDC a nivel mundial. Finalmente, en el capítulo V se resume como caso para ALC, el estudio sobre el impacto de las medidas y tecnologías de RDC sobre los ODS.

I. Metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y las Contribuciones Nacionalmente Determinadas. El problema de la insuficiencia y las metas climáticas globales

En este capítulo se describe la importancia de las NDC para cumplir con las metas globales del Acuerdo de París. Se señalan los elementos principales de las NDC para alcanzar una trayectoria de emisiones consistente con los compromisos adquiridos y adaptarse a los efectos del cambio climático, haciendo énfasis en las capacidades locales, las limitaciones y la visión multidimensional del problema. Posteriormente, se presenta el caso de ALC y el problema de la insuficiencia de las NDC para cumplir con las metas establecidas en el Acuerdo de París.

A. Acuerdo de París y los compromisos nacionales para alcanzar las metas climáticas

El cambio climático emerge como un problema global que produce desafíos colectivos y obliga a emprender acciones coordinadas entre países. A nivel individual, las actividades antropogénicas generan una serie de efectos negativos que se transmiten globalmente a través de canales diversos y complejos, con graves consecuencias ambientales, económicas y sociales. En concreto, las emisiones de GEI generan modificaciones permanentes y fundamentales sobre el clima global de la tierra, y sobre la intensidad y frecuencia de los fenómenos climáticos extremos. Además, las dimensiones ambientales del problema interactúan estrechamente con consideraciones económicas y sociales de equidad, inclusión, desarrollo sostenible y justicia, lo cual representa un reto adicional y exige esfuerzos de naturaleza holística.

Por esta razón, se propone y adopta, en el año 2015, el Acuerdo de París sobre el cambio climático, como un mecanismo internacional para mitigar las emisiones de GEI y crear capacidad adaptativa, que permitiese responder a los impactos de la crisis climática en todo el mundo. A partir de acciones concretas en diferentes horizontes de tiempo, los países firmantes se comprometen a mantener el aumento de la temperatura mundial por debajo de los 2°C, con respecto a niveles preindustriales, y a realizar esfuerzos para limitar dicho aumento a 1,5°C (UNFCCC, 2015).

De acuerdo con las proyecciones climáticas del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París, bajo un escenario futuro de reducción estricta de emisiones (RCP 2.6)¹, encauzan la temperatura media global hacia las metas propuestas para final de siglo. No obstante, la trayectoria actual de emisiones, bajo el escenario RCP 8.5, conduce a un cambio de la temperatura media global muy por encima de estas metas, con un aumento mayor o igual a 4°C, lo cual generaría consecuencias devastadoras sobre los ecosistemas, la estructura económica y el tejido social (IPCC, 2013). Para la región de ALC, la tendencia histórica es similar y los efectos negativos de la crisis ambiental ya están presentes, con fenómenos extremos cada vez más intensos y frecuentes a lo largo del territorio (Magrin, 2014). Asimismo, los modelos climáticos y las trayectorias futuras revelan la fragilidad de nuestros ecosistemas y la interdependencia entre regiones. Detrás de las metas globales, se incluyen responsabilidades locales y objetivos complementarios entre los países firmantes, así que la implementación efectiva del Acuerdo de París requiere de un enfoque que reconozca estos elementos.

B. Las NDC, el principal mecanismo para construir planes vinculantes y cumplir con las metas globales

Con base en lo anterior, se induce a los países a diseñar e implementar políticas ambiciosas de mitigación y adaptación, de manera que los compromisos del Acuerdo de París se traduzcan en actividades precisas y vinculantes. Así pues, se dispone, como el componente central para lograr los objetivos globales, a las NDC, las cuales constituyen el principal mecanismo para establecer los compromisos individuales y esfuerzos nacionales, para mitigar las emisiones de GEI y adaptarse a los efectos del cambio climático en un contexto específico. Por lo tanto, las NDC plasman las condiciones presentes y capacidades de los países para contribuir con la consecución de los objetivos climáticos del Acuerdo de París (Samaniego et al., 2019).

Cada cinco años, los miembros deben comunicar los avances y proponer progresivamente metas más ambiciosas. Los compromisos y las acciones se informan después de pasar por un proceso riguroso de planificación e implementación institucional, en donde se fijan estrategias relacionadas con el financiamiento, el monitoreo y reporte, la gobernanza y la creación de programas y planes ambientales. De la misma manera, se establecen los sectores prioritarios y los requerimientos de ayuda internacional.

Con base en este proceso, los países construyen una hoja de ruta para lograr la carbono—neutralidad en la mitad del siglo XXI, y contribuir a la reducción de la temperatura media global a partir de la mitigación de sus emisiones. Una vez se reportan las NDC de los países firmantes, se revela la capacidad real del Acuerdo de París para alcanzar las metas propuestas en un momento dado del tiempo, ya que, únicamente a través de los planes nacionales, se crean pactos climáticos vinculantes (Samaniego et al., 2019).

Como parte del esfuerzo colectivo consagrado en el Acuerdo de París, se reconoce que las NDC están enmarcadas en un contexto nacional, en donde las metas de mitigación y adaptación se ponderan en función de necesidades locales y de la coyuntura económica y social. En ese sentido, la ambición de los objetivos considera un conjunto amplio de factores que se insertan en los sectores climáticos y producen impactos en otras dimensiones, como pobreza, desigualdad, crecimiento e inclusión, así que las NDC se configuran de manera diferente en los países desarrollados y los países en vías de desarrollo. Se trata, entonces, de articular los planes individuales por medio de una valoración completa de las condiciones nacionales y de las conexiones entre países.

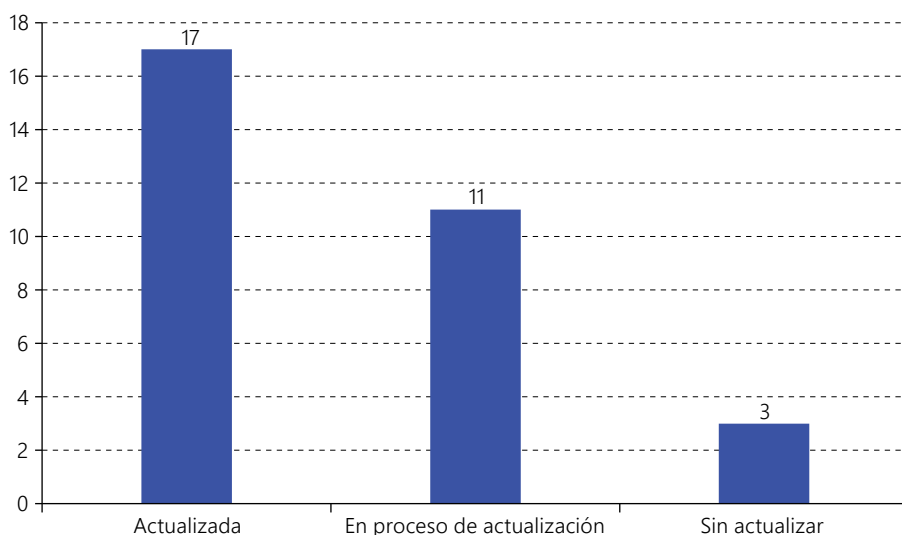
Este reconocimiento, en lugar de limitar la acción climática local, permite aprovechar al máximo el potencial transformador de las políticas e identificar los principales motores de cambio. A partir de esto, se busca la elaboración participativa de las NDC, incorporando las opiniones, necesidades, derechos y aspiraciones de toda la sociedad, de manera que el diseño y la implementación sean pertinentes,

¹ Las trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) son escenarios futuros de las concentraciones y emisiones de GEI, y funcionan como guía para monitorear el cumplimiento de las metas del Acuerdo de París. Son escenarios verosímiles que permiten entender las posibles consecuencias de las políticas climáticas (IPCC, 2018).

oportunas, transparentes e inclusivas (Muñoz Ávila, 2016). Según las recomendaciones del Acuerdo de París, los países deben incluir en sus NDC la siguiente información: proceso de planificación; fuentes de información cuantificable; plazos de implementación; alcance y cobertura; supuestos y enfoques metodológicos; consideraciones sobre la equidad y la ambición de la NDC; y detalles sobre el logro de los objetivos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) (Bakkegaard, 2015).

Después de más de cinco años de la ratificación del Acuerdo de París, los países se enfrentan al reto de fortalecer sus planes nacionales y acelerar la implementación de políticas de mitigación y adaptación. De acuerdo con el último informe de síntesis sobre las NDC de la UNFCCC, 164 planes, de 191 de las Partes, se encuentran disponibles en su versión más reciente, con 86 compromisos nuevos o actualizados, y que representan el 93.1% del total de las emisiones mundiales de 2019 (UNFCCC, 2021). En ALC, 17 de las 33 Partes firmantes del Acuerdo presentaron sus planes actualizados en agosto de 2021, representando más de un 83% de las emisiones de la región (Samaniego et al., 2022).

Gráfico 1
Estado de las NDC en América Latina y el Caribe
(Número de países)



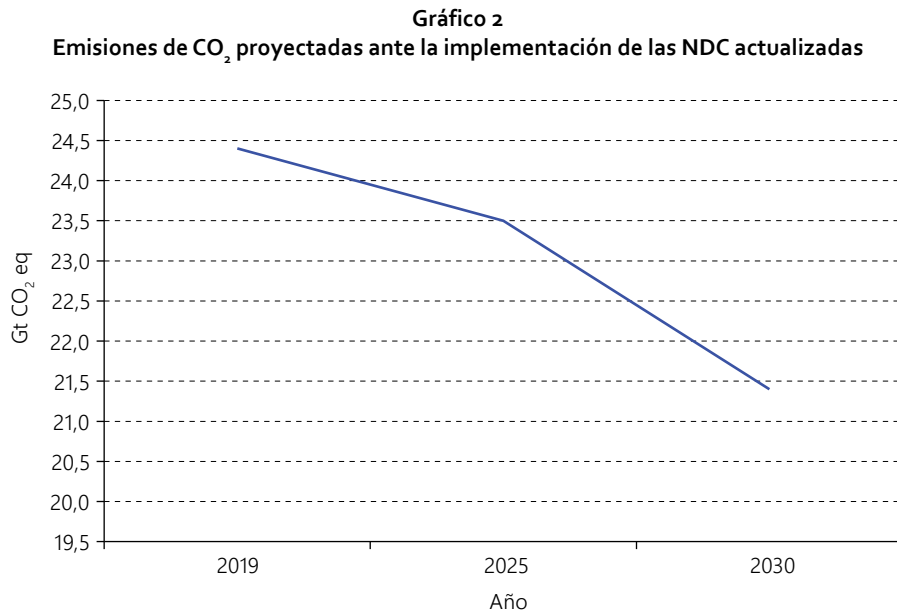
Fuente: Samaniego et al., (2022).

C. La ambición de las metas nacionales y el problema de la insuficiencia

A nivel global, los países más pobres y las regiones más vulnerables son quienes lideran la implementación de NDC cada vez más ambiciosas, ya sea por la actualización de sus metas de mitigación o la introducción de nuevas acciones de adaptación. En 2021, los países menos desarrollados (Least Developed Countries) y las pequeñas islas en vía de desarrollo (Small Island Developing States) lideran el aumento en la ambición de las NDC, con 86% de estos países aumentando la magnitud de sus objetivos de reducción de emisiones. No obstante, es necesario elevar el esfuerzo de los países desarrollados del G20 (Group of Twenty), que emiten más del 75% de los GEI mundialmente y concentran cerca del 80% del producto interno bruto (PIB). Actualmente, 16 de los países miembros han comunicado las versiones revisadas de sus NDC, y cinco de éstos no aumentaron la ambición de sus metas (UNDP, 2021).

Bajo el estado actual de las NDC, la suma de los compromisos nacionales conduciría a un aumento de 3°C en la temperatura media global de la tierra en 2100, con respecto a valores preindustriales, y el nivel máximo se alcanzaría antes del año 2030. Se estima que las emisiones totales de GEI en los países que presentaron sus NDC actualizadas estarían alrededor de 23,5 Gt de CO₂ eq en 2025 y 21,4 Gt de CO₂ eq en 2030, en comparación con las emisiones del año 2019, que eran de 24,4 Gt de CO₂ eq. Por otro lado,

cuando se incluyen las NDC desactualizadas, las emisiones de todas de las Partes serían de 54,8 y 55,1, respectivamente (UNFCCC, 2021). No obstante, el Informe Especial sobre Calentamiento Global de 1,5°C del IPCC sugiere que los países deben comprometerse con disminuciones más pronunciadas en las emisiones de GEI. En concreto, se espera reducir las emisiones antropogénicas netas de CO₂ globalmente en un 45%, con respecto a los niveles de 2010, para el año 2030, y alcanzar la carbono-neutralidad en 2050, de manera que el aumento en la temperatura media de la tierra no sobrepase los 1,5°C (IPCC, 2018). Con respecto al presupuesto de carbono, las NDC más recientes utilizarían un 89% en el periodo 2020-2030, dejando solo 55 Gt de CO₂ para limitar el aumento de la temperatura a 1,5°C, con una probabilidad del 50%. A partir de lo anterior, es imperativo aumentar el nivel de ambición de las NDC para alinear las emisiones con las trayectorias consideradas por el IPCC para cumplir con el Acuerdo de París (UNFCCC, 2021).



Fuente: Elaboración propia con base en UNFCCC (2021).

En la región de ALC, y según un estudio realizado por CEPAL en 2019 (Samaniego et al., 2019), los compromisos incondicionales de mitigación en las NDC conducirían a una reducción de 13% en las emisiones de GEI para el año 2030, con respecto a un escenario inercial, y la reducción ascendería a 23% con las metas condicionales, lo cual es insuficiente para lograr el objetivo de 1,5°C, aunque se acerca medianamente a la meta de 2°C. Con base en la actualización del estudio, presentado en el año 2022 (Samaniego et al., 2022), los compromisos incondicionales conducirían a una reducción de emisiones de 22%, con respecto a un escenario inercial, mientras que con las metas condicionales la reducción asciende a 28%. Esto implica un aumento de la ambición climática de 400 MtCO₂ eq₂, con respecto a las NDC presentadas en 2015. Sin embargo, y para cumplir con la meta de 2°C y 1,5°C del Acuerdo de París, los países deberían establecer compromisos para reducir las emisiones en 39% y 55% respectivamente. Para desplazarse hacia la trayectoria consistente con el Acuerdo de París, los países de la región deberían triplicar la velocidad de descarbonización en los próximos 10 años. No obstante, cabe resaltar que aproximadamente 60% de las emisiones de ALC se concentran en tres países, Argentina, Brasil y México.

Por otro lado, gran parte de las NDC a nivel mundial reportan otras metas para redireccionar sus economías hacia una senda sostenible, baja en carbono y resiliente. Se mencionan las dimensiones ambientales, económicas y sociales del problema y su vínculo con los ODS. Cerca del 20% de las NDC presentadas analizan la relación entre las políticas climáticas de sus planes y los ODS, haciendo énfasis en los vínculos identificados en cada uno de los 17 objetivos. Por ejemplo, sobresale la presencia de consideraciones de género en casi la mitad de los planes, a través del desarrollo de políticas, programas,

objetivos e indicadores. Además, las NDC actualizadas a 2021 realizan mayores esfuerzos para incorporar la opinión de la sociedad civil, el sector privado, las ONG y las agencias de gobierno, lo cual aumenta el nivel de ambición en las políticas de mitigación y adaptación (UNDP, 2021).

Asimismo, se hace alusión a los mecanismos para incorporar las NDC en los procesos legislativos y regulatorios nacionales, de manera que los países tengan la capacidad real de aplicar las políticas. Se incluye información sobre arreglos institucionales, asignación de responsabilidades y brechas existentes en el marco legal. A partir de este proceso, los compromisos nacionales empiezan a adquirir un carácter vinculante que garantice el cumplimiento del Acuerdo de París en el largo plazo.

Si bien actualmente se cuenta con el conocimiento científico y un conjunto amplio de herramientas para luchar contra el cambio climático, la financiación constituye uno de los principales obstáculos para aumentar la ambición. De acuerdo con IPCC (2018), se requieren entre 1,6 y 3,8 trillones de dólares anuales, de aquí a 2050, para satisfacer el lado de la oferta de energía, y las NDC esperan contar con entre 3,5 y 4,4 para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones, lo cual se aleja mucho del capital climático disponible (UNDP, 2021).

Por otro lado, los compromisos condicionales de los países en desarrollo dependerán del acceso a financiamiento, la velocidad con que se asignan estos recursos y el alineamiento de sus propios mercados de capitales con los objetivos del Acuerdo de París. Tanto en el año 2019 como en 2021, los países reconocen al financiamiento como la principal barrera para acelerar la implementación de sus NDC. De acuerdo con la encuesta realizada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, o UNDP por sus siglas en inglés) en el "State of Climate Ambition", solo un 15% de los países tiene una estrategia de financiamiento definida en sus planes actualizados. Además, los recursos provienen principalmente del sector público, lo cual puede ser riesgoso para países pobres, con sistemas fiscales frágiles, espacio fiscal reducido y poco acceso a mercados internacionales (UNDP, 2021). En ese sentido, cabe resaltar la importancia del sector privado para cerrar la brecha de recursos y diseñar estrategias de financiamiento sostenibles en el tiempo (CEPAL, 2021).

Paralelamente, la viabilidad de las NDC dependerá de factores relacionados con la construcción de capacidades institucionales y la transferencia de tecnología. Una vez los países dispongan del capital financiero para ejecutar sus planes, será necesario eliminar barreras de gobernanza climática y crear mecanismos de coordinación entre las organizaciones encargadas de implementar el plan, de manera que se aproveche al máximo el potencial de las acciones priorizadas.

D. El problema del cambio climático y los compromisos nacionales en América Latina y el Caribe

Para la región de ALC, la información sobre las NDC se encuentra disponible, en gran parte, en las páginas web oficiales de los ministerios de ambiente de los países, con detalle del proceso de participación ciudadana y los demás elementos de la planificación, implementación y seguimiento. Adicionalmente, la herramienta NDC LAC, desarrollada por agencias de las Naciones Unidas y otras organizaciones, recopila información relevante sobre los compromisos, el estado de cumplimiento de las NDC, las políticas desarrolladas e indicadores clave de seguimiento (CEPAL, n.d.). En el recuadro 1 se especifica más información sobre la herramienta NDC LAC.

El proceso de elaboración de las NDC en la región requeriría contemplar los factores que caracterizan el problema del cambio climático y los contextos socioeconómicos de los países. A nivel general, la región de ALC padece una asimetría marcada entre la contribución a las emisiones de GEI mundiales y la vulnerabilidad climática (Bárcena et al., 2020).

Los efectos negativos del cambio climático se transmiten a los países de la región de forma heterogénea y no lineal, con consecuencias sobre los sectores productivos y demás sectores rurales y urbanos. Se estima que, para el año 2050, las pérdidas económicas por el cambio climático oscilarían entre 1,5% y 5% del producto interno bruto (PIB) regional (Bárcena et al., 2020).

Recuadro 1
NDC LAC

El NDCLAC es una herramienta de información para compartir los compromisos, avances y el estado de cumplimiento de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional en los países de América Latina y el Caribe. Esta es una iniciativa desarrollada por CEPAL, en conjunto con EUROCLIMA+, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Fundación Avina y la Plataforma Regional LEDES LAC, la cual busca generar sinergias para mejorar la efectividad y acelerar la implementación del Acuerdo de París en la región. Con el acceso transparente a esta información, se busca retroalimentar el proceso de diseño de planes, políticas y proyectos climáticos, con base en experiencias pasadas y la evidencia científica. A partir del reconocimiento de brechas, desafíos y fortalezas, la plataforma permite visualizar el estado actual de las NDC en la región y esbozar los siguientes pasos para aumentar la ambición de las metas.

El NDC LAC consolida, en un solo lugar, la información de tres esfuerzos complementarios:

- i) El trabajo de sistematización y análisis del Diálogo entre Pares-acción financiada por EUROCLIMA+ y ejecutada a través de una alianza estratégica entre GIZ y CEPAL con apoyo de Fundación Avina.
- ii) El estudio con el panorama sobre las NDC en la región realizado por CEPAL.
- iii) El reporte LEDES en LAC conducido por la plataforma LEDES LAC con apoyo de BID y PNUD.

Fuente: Elaboración propia con base en CEPAL (n.d.).

Resulta fundamental que los países de ALC incluyan en sus estrategias nacionales de desarrollo sostenible, en particular en sus NDC, un amplio portafolio de políticas de adaptación. Según estimaciones del Banco Mundial, el costo económico de estas políticas, en países en desarrollo y para la mitad del siglo XXI, es aproximadamente el 0,12% del PIB. Para la región en específico, el costo estimado es inferior al 0,5% del PIB, y se concentra en los sectores de agricultura, recursos hídricos, zonas costeras, salud y biodiversidad (Banco Mundial, 2010). Además, y de acuerdo con la UNFCCC, son necesarios recursos financieros de aproximadamente 23.000 millones de dólares para implementar las políticas de adaptación en el sector de recursos hídricos en 2030, y entre 570 y 680 millones de dólares en el sector de zonas costeras, en ambos casos para la construcción de infraestructura resiliente y medidas de adaptación “dura” (UNFCCC, 2007).

Sin embargo, este proceso de adaptación, aunque imprescindible, supone grandes retos y limitaciones. A pesar de que las soluciones al cambio climático deben ser globales, las estrategias de adaptación están basadas en necesidades y capacidades locales, ya que son los países los principales responsables y beneficiarios de ajustar sus estructuras para responder a la crisis ambiental. Las medidas de adaptación tienen menos co-beneficios (o externalidades) mundiales, en comparación con las medidas de mitigación, pues se reforman los sistemas en una zona geográfica específica (CEPAL, 2015). No obstante, el IPCC propone la instrumentación simultánea de las políticas de mitigación y adaptación en los planes nacionales, reconociendo su complementariedad e interconexión (Magrin, 2014). Asimismo, es importante garantizar la cooperación internacional para que la transición hacia una economía baja en carbono sea uniforme en todo el mundo.

Por lo anterior, y con base en información actualizada y presentada por J. Samaniego et al. (2022), la mayoría de las NDC de la región priorizan los sectores y las acciones de adaptación, con 32 de 33 países que incluyen estas estrategias en sus planes nacionales, lo cual evidencia la importancia de responder a los cambios en las condiciones del clima (cuadro 1). Además, el 70% de los países de ALC incluye tanto medidas de adaptación como medidas de mitigación en sus NDC, en virtud de los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París. Con respecto a las NDC actualizadas en 2021, 14 de los 17 nuevos documentos fortalecen el componente de adaptación.

Cuadro 1
Distribución sectorial de las medidas de mitigación y adaptación en la CDN. Sectores incluidos en las CDN
para los países que presentaron su plan actualizado

País	Energía	FOLU	Agua	Transporte	Desechos	Industrias	Edificios	Agricultura	Salud
Argentina									
Brasil									
Chile									
Colombia									
Costa Rica									
Cuba									
Granada									
Honduras									
Jamaica									
México									
Nicaragua									
Panamá									
Paraguay									
Perú									
República Dominicana									
Santa Lucía									
Suriname									

País	Biodiversidad, bosques y AbE	Infraestructura	Ciudades, AH y OT	Zonas costeras y océanos	Gestión de riesgos	Turismo	Educación	Desarrollo social
Argentina	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
Brasil		▲	▲		▲			
Chile	▲	▲	▲	▲	▲	▲		
Colombia	▲	▲	▲	▲	▲			▲
Costa Rica	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
Cuba	▲	▲	▲	▲	▲	▲		
Granada	▲					▲		
Honduras	▲	▲	▲					▲
Jamaica	▲	▲	▲	▲	▲	▲		
México	▲	▲	▲	▲	▲			
Nicaragua	▲	▲	▲					
Panamá	▲	▲	▲	▲	▲			
Paraguay	▲	▲	▲		▲			
Perú	▲	▲		▲	▲	▲		
República Dominicana	▲		▲	▲	▲	▲	▲	
Santa Lucía	▲	▲	▲	▲		▲	▲	
Suriname	▲	▲		▲				

Fuente: Elaboración propia con base en Samaniego et al. (2022).

Para el caso de la mitigación, los sectores más importantes, según su potencial para reducir las emisiones de GEI, son energía, transporte, agricultura y AFOLU (*Agriculture, forestry and other land use*—*Agricultura, silvicultura y otros usos de suelo*—), y se enfocan en el despliegue de energías renovables, la gestión sostenible de la biodiversidad, la agricultura climáticamente inteligente (CSA, por sus siglas en inglés) y la regulación. Esta tendencia es consistente con la estructura sectorial de las emisiones en la región, donde 29% de las emisiones totales provienen del sector energía, 26% del sector de agricultura, 20% del sector FOLU y 15% del sector transporte. Por otra parte, la actualización de las NDC permitió incluir otros sectores, como la gestión de residuos, la biodiversidad y el sector vivienda, e introducir un enfoque multisectorial.

Con respecto a la adaptación, las políticas se centran en reducir o eliminar la vulnerabilidad en los sectores que están más expuestos. En las NDC de la región de ALC, el sector de adaptación más importante es el de recursos hídricos, donde se incluyen acciones de sostenibilidad y seguridad hídrica, manejo sostenible de las cuencas, saneamiento de las aguas residuales y aplicación de un marco regulatorio sobre el uso del agua y las actividades agrícolas. Se destacan a su vez los sectores de salud, biodiversidad y agricultura, con presencia en la mayoría de los compromisos en la región. Por otra parte, los sectores de turismo, infraestructura, ciudades resilientes y zonas costeras están circunscritos a un conjunto reducido de países que tiene condiciones particulares, y en donde las medidas propuestas dependen de la estructura de desarrollo y de los impactos anticipados del cambio climático.

1. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y las NDC

A nivel mundial, las NDC proyectan la reducción de 25% de las emisiones en el sector de AFOLU (Grassi, 2017), y se estima que las SbN tienen el potencial de reducir globalmente el 30% de las emisiones necesarias para cumplir con las metas de Acuerdo de París en 2030 (Seddon, 2020).

De las nuevas NDC presentadas a nivel mundial, el 21% incluyen la gestión de los humedales como una estrategia de mitigación, mientras que las medidas de reforestación y el manejo de los bosques están en al menos un 55% de los compromisos. Asimismo, las SbN se introducen en estos documentos como herramientas para la restauración de las costas y la prevención de desastres en zonas expuestas al alza del nivel del mar y la acidificación de los océanos, al igual que para la construcción de infraestructura resiliente. Resulta igualmente importante disponer de estas alternativas para abordar los retos del desplazamiento forzado de asentamientos humanos vulnerables a los riesgos del cambio climático (UNFCCC, 2021). A partir de esta aproximación sistémica, los países pueden generar impactos más grandes y transversales a varios sectores.

En el caso de ALC, las NDC actualizadas también revelan un avance significativo en la SbN. Sobresalen medidas relacionadas con la conservación de los bosques y la reforestación, las cuales favorecen el secuestro de carbono, reducen la vulnerabilidad ante fenómenos extremos y protegen el medio ambiente. Por ejemplo, se destacan países como Costa Rica, Colombia, Chile, México y Panamá, que incluyen acciones para conservar los bosques y reforestar el territorio. Para la región, estas soluciones traen beneficios ambientales, económicos y sociales y aumentan la capacidad adaptativa de los países. Por ejemplo, Cuba, en su NDC, busca proteger las playas, los arrecifes, los manglares y sus ecosistemas con el fin de disminuir el impacto humano y económico de los huracanes (Samaniego et al., 2022).

2. Medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono (RDC) y las NDC

Las estrategias de mitigación consideradas por el IPCC en la construcción de trayectorias futuras incorporan las medidas y tecnologías de RDC, también llamadas emisiones negativas, para alcanzar las metas del Acuerdo de París. Según los escenarios proyectados, el uso de éstas debería oscilar entre 100 y 1.000 Gt CO₂, durante el siglo XXI, para que la temperatura global de la tierra no sobrepase los 1,5°C, por lo que, estas estrategias podrían resultar fundamentales para estabilizar las emisiones de CO₂ en sectores que experimentan retos para la descarbonización. No obstante, la adopción de estas medidas y tecnologías está sujeta a limitaciones de sostenibilidad y factibilidad, pues están en una etapa temprana de implementación (IPCC, 2018).

Las medidas y tecnologías de RDC corresponden a un conjunto de técnicas o procesos para remover CO_2 de la atmósfera y compensar las emisiones residuales. Estas tecnologías se pueden clasificar en dos tipos: aquellas que mejoran los procesos naturales que eliminan CO_2 de la atmósfera, como los árboles, humedales u otros sumideros de carbono, o aquellas que utilizan procesos químicos para capturar directamente el CO_2 y almacenarlo².

Actualmente, las medidas y tecnologías de RDC no tienen una presencia importante en las estrategias nacionales del Acuerdo de París, ya que permanecen como un campo exploratorio, con incertidumbre sobre los costos, riesgos e impactos esperados. En ALC, las NDC incluyen pocas medidas o líneas de acción sobre estas tecnologías y no forman parte de un plan prioritario para fortalecer la capacidad adaptativa o reducir las emisiones. Se identifican únicamente acciones aisladas, como el uso de nuevas tecnologías de generación, almacenamiento, transmisión y distribución de energía, pero no se profundiza con políticas concretas para impulsar la adopción de las medidas y tecnologías de RDC (Samaniego et al., 2022). Por lo tanto, resulta fundamental desarrollar procesos de investigación e innovación para evaluar los efectos esperados de la implementación de estas tecnologías en los países de la región. Lo anterior permite fijar los pasos previos al diseño de una hoja de ruta, a través de su consideración en las NDC, que contribuya a superar los obstáculos ya mencionados.

² En el capítulo IV de este documento se desarrollan las medidas y tecnologías de RDC encontradas en la literatura y que cuentan con algún grado de desarrollo o implementación a nivel mundial.

II. Las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono y su importancia para América Latina y el Caribe: panorama regional, retos y oportunidades

En este capítulo se introducen las medidas y tecnologías de RDC como una alternativa para cumplir con las metas climáticas globales, pudiendo corresponder como complemento a los sectores identificados en las NDC. Se exponen los retos, las oportunidades y la necesidad de avanzar hacia su implementación en el contexto de ALC.

De acuerdo con los escenarios climáticos futuros construidos por el IPCC, todas las trayectorias consistentes con el cumplimiento de las metas del Acuerdo de París proyectan el uso de las medidas de RDC, ya sea en el corto, mediano o largo plazo. En caso de que el aumento global de la temperatura sobrepase temporalmente los 1,5°C, se requerirá que la cantidad de CO₂ removida de la atmósfera supere la cantidad que ingresa, lo que da como resultado “emisiones netas negativas”. Dadas unas condiciones climáticas frágiles, estas tecnologías funcionan como un mecanismo estabilizador para responder a choques inesperados, aumentando así la capacidad adaptativa de los países. A medida que los ecosistemas biológicos se acerquen a los límites planetarios y sus puntos de inflexión, será necesario un mayor despliegue de las medidas de RDC para reorientar las emisiones hacia trayectorias sostenibles (IPCC, 2018).

ALC se caracteriza por la asimetría entre bajas emisiones y alta vulnerabilidad, porque la región aporta una mínima fracción a los GEI a nivel mundial, pero sufre de manera desproporcionada los efectos del cambio climático (Bárcena et al., 2020). Este panorama impone presiones adicionales para mejorar la capacidad adaptativa y recurrir a otro tipo de soluciones, como, por ejemplo, las medidas de RDC más relacionadas y/o basadas en la naturaleza (Samaniego et al., 2021).

Los sectores productivos que tienen oportunidades de mitigación y adaptación en ALC son especialmente vulnerables a los impactos del cambio climático, tanto por los riesgos físicos como por los riesgos de transición. Por ejemplo, el sector agrícola desempeña un rol estratégico en los países de la región, pues concentra cerca del 5% del PIB, el 20% de la población ocupada y el 25% de las exportaciones, pero sus actividades son particularmente sensibles al cambio climático, que se espera produzca cambios permanentes en los ciclos de los cultivos, la productividad del campo, la estructura y los rendimientos. De

hecho, se estima que la productividad de la agricultura puede caer entre 12,9% y 24,3% como resultado del cambio climático en ALC, con impactos heterogéneos según las condiciones socioeconómicas, geográficas, climáticas y tecnológicas de los países (Bárcena et al., 2018).

Por otra parte, el sector energético de la región representa menos del 5% de las emisiones mundiales, pero está altamente expuesto a los choques en el sistema de generación eléctrica, por las variaciones del clima global y la intensificación de fenómenos extremos. En ese sentido, resulta importante modificar sosteniblemente la demanda de energía y redistribuir las fuentes (Bárcena et al., 2018).

Del mismo modo, la región se caracteriza por la presencia de gran riqueza en biodiversidad y ecosistemas terrestres y marítimos. A nivel mundial, ALC concentra el 24% de las ecorregiones terrestres, el 18% de las ecorregiones marinas del mundo y un tercio de los recursos hídricos del planeta (UNEP, 2022; BID, 2018). Esto genera el potencial para absorber naturalmente el CO₂ a través de sumideros de carbono, como humedales, bosques, océanos, manglares y páramos. Además, un 20% de los empleos en ALC dependen fuertemente de los servicios ecosistémicos y un 12% de las viviendas son construidas con productos derivados del bosque (CEPAL y OIT, 2018; Hickey & Wellenstein, 2020).

Cuadro 2
Datos de biodiversidad en América Latina y el Caribe

Datos de biodiversidad en América Latina y el Caribe
24% de las ecorregiones terrestres del mundo se encuentran en América Latina y el Caribe
18% de las ecorregiones marinas del mundo se encuentran en América Latina y el Caribe
1/3 de los recursos hídricos se concretan en la región
20% de los empleos en América Latina y el Caribe dependen fuertemente de los servicios ecosistémicos
12% de las viviendas son construidas con productos derivados del bosque

Fuente: Elaboración propia con base en UNEP (2022); BID (2018); CEPAL y OIT (2018); Hickey & Wellenstein (2020).

Así pues, el manejo, la regeneración y el aprovechamiento de estos ecosistemas permite a los países de la región aumentar la capacidad de mitigación y adaptación de forma sostenible y conservar el patrimonio de la región. Además, la gestión de los sumideros de carbono involucra directamente la participación comunitaria y permite, simultáneamente, abordar otros objetivos sociales y económicos (BID & DDPLAC, 2019). En el recuadro 2, se presenta el resumen de un estudio sobre los potenciales impactos positivos de la conservación de manglares, para gestionar los riesgos climáticos en los ecosistemas costeros.

Recuadro 2
La restauración de manglares como herramienta de adaptación en los ecosistemas costeros

Los manglares son ecosistemas costeros que integran el ambiente marino y terrestre y producen grandes beneficios para la adaptación climática. Además de ser poderosos sumideros de carbono y promover la conservación de la biodiversidad, los manglares tienen un gran potencial para proteger las costas, reduciendo el oleaje, la erosión y la intensidad de fenómenos climáticos extremos. En ese sentido, la gestión sostenible y restauración de los manglares sobresale como una solución basada en la naturaleza que permite aumentar la capacidad adaptativa, mitigar las emisiones de CO₂ y proteger a las comunidades.

Con lo anterior en mente, investigadores del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria realizaron un estudio para estimar la capacidad de los manglares para atenuar las olas marinas y proteger las costas, a través de una nueva aproximación metodológica que identifica la relación causal entre la edad de los manglares y la atenuación del oleaje. El estudio se basa en especies de *Rhizophora mangle* en Vietnam, Australia y Japón, considerando las características del ecosistema, las propiedades de las olas (altura y periodo), la morfología de los árboles, la densidad del bosque y los niveles de profundidad del agua, sin hacer uso de calibraciones. Los datos disponibles y el método de estimación ayudan a calcular la capacidad de atenuación a lo largo de todo el ciclo de vida de los manglares, lo cual permite determinar el tiempo esperando para que las medidas de protección y restauración tengan un efecto sobre el oleaje.

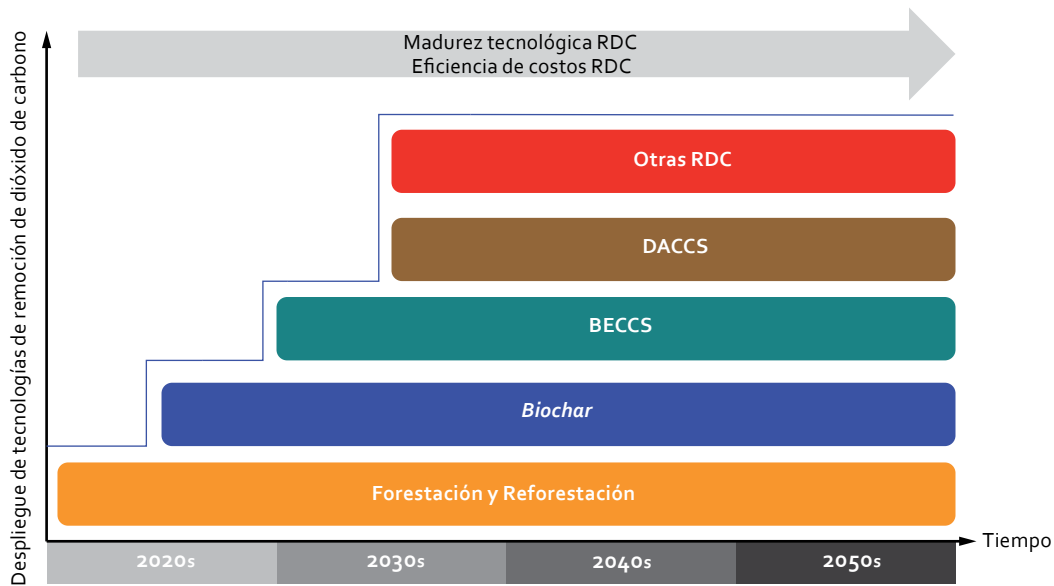
A partir de esto, los investigadores encuentran que, después de la restauración, el manglar toma 5 años para obtener la máxima capacidad de protección costera y la mantiene durante el resto de su vida. Estos resultados incentivan la restauración y gestión sostenible de los manglares, pues proporcionan estimaciones precisas sobre el horizonte de tiempo esperado para percibir el potencial máximo de la política, facilitando la toma de decisiones y la aceleración la adopción de soluciones basadas en la naturaleza en el manejo de las costas.

Fuente: Elaboración propia con base en Maza et al. (2021).

Con base en lo anterior, las medidas y tecnologías de RDC surgirían como alternativa para responder a los retos climáticos, económicos y sociales de la región, de manera que las trayectorias futuras sean consistentes con las metas del Acuerdo de París. Sin embargo, resulta igualmente importante comprender los impactos esperados del despliegue o implementación de las medidas y tecnologías de RDC desde un enfoque multidimensional, considerando los efectos colaterales negativos que se podrían manifestar directa o indirectamente.

Con base en lo anterior, el estudio titulado “Impacto de las medidas y/o tecnologías de RDC sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en países seleccionados en América latina y el Caribe”, realizado por J. Samaniego et al. (2021) y el cual se resume como un caso de estudio en el capítulo V, evalúa de forma rigurosa los potenciales beneficios e impactos de la implementación a gran escala de las medidas y tecnologías de RDC en la región de ALC. Los resultados destacan la importancia de avanzar en la investigación y la implementación de proyectos piloto sobre estas medidas y tecnologías, en el corto, mediano y largo plazo, priorizando de acuerdo con la madurez tecnológica y la eficiencia de costos. Estos procesos deben comenzar con bastante anterioridad a la fase de implementación a gran escala, con el objetivo de alcanzar un desarrollo tecnológico adecuado y optimizar los costos financieros. En el diagrama 1, se presenta una propuesta de proceso para la implementación a gran escala de las medidas y tecnologías de RDC en los países de ALC, sugerido en Samaniego et al. (2021).

Diagrama 1
Sugerencia de despliegue a gran escala de opciones de RDC por fases en países de América Latina y el Caribe



Fuente: Elaboración propia con base en Samaniego et al. (2021).

De modo general, la transición debe reconocer los vínculos formados entre el sistema productivo de los países y los recursos naturales que coexisten en la misma zona geográfica, de manera que el proceso sea integrado, transformador e inclusivo, ya que ni el medio ambiente ni las estructuras socioeconómicas operan aisladamente en el territorio. Más bien, hacen parte de un entorno completamente interrelacionado y sensible a los cambios. Lo anterior suscita la necesidad de entender en detalle los problemas relacionados al aprovechamiento y manejo de los recursos naturales. Por esta razón, en el siguiente capítulo se profundiza en el problema de la desertificación de los suelos en ALC y en cómo las SbN, en especial las medidas de RDC que están más basadas en la naturaleza como la forestación y reforestación pueden contribuir a cumplir objetivos ambientales, económicos y sociales.

III. El problema de la degradación de los suelos y la desertificación. La deforestación: el contexto global centrado en América Latina y el Caribe

La necesidad de proponer caminos de sostenibilidad para la economía de América Latina y el Caribe coherentes con los agudos desafíos del siglo XXI instiga a la inserción de nuestra economía en los límites, potencialidades y productividad de nuestros ecosistemas. La prosperidad, la democracia, la seguridad y el bienestar de nuestros pueblos no pueden ser alcanzadas sin que nuestro sistema ambiental y sus límites biofísicos sean profundamente considerados por las estrategias regionales de desarrollo económico. De la misma manera, las cadenas productivas, los empleos y generación de renta deben desarrollarse sobre el funcionamiento sostenible de los ecosistemas, maximizando la productividad ofrecida por sus servicios y bienes. Necesitamos, así, de un conjunto de políticas articuladas y coherentes con los desafíos de nuestro tiempo que nos permita superar el freno hacia la sostenibilidad que nos impone el corriente uso del suelo en ALC, acelerando la necesaria transición en ese sentido.

La generación de nuevos empleos e ingresos debe considerar nuevos procesos de producción y consumo más sostenibles, facilitando innovaciones en el ambiente urbano, promoviendo el mantenimiento de la capacidad productiva de sistemas agro/silvo/pastoriles y una fuerte transición hacia las energías renovables. La estrategia de acción debe priorizar sectores que tienen posibilidad de diseminar impactos en la economía de manera sinérgica y que, por lo tanto, constituyen condiciones iniciales de avanzar/ producir un gran impulso ambiental.

La gestión eficiente de los nexos entre agua, suelos y biodiversidad deben encontrar expresión en una nueva ruralidad donde sistemas integrados agrosilvopastoriles y procesos bioeconómicos promuevan nuevas formas de organización de las cadenas de valor asociadas a los recursos naturales (bio-cadenas) y la generación de flujos de economía circular. La identificación/selección de las mejores estrategias de manejo de los paisajes permite el aumento de la productividad (animal y por área), menores huellas ambientales y la recuperación de áreas degradadas con emisiones negativas. La conversión ambiental de la producción agropecuaria, por lo tanto, permite crear riqueza y empleo con una amplia distribución de beneficios económicos y sociales.

A. El estado de los bosques en América Latina y el Caribe

Desde la lucha contra la pobreza y el hambre hasta la mitigación del cambio climático y la conservación de la biodiversidad, los efectos de los bosques y los árboles contribuyen a la consecución de múltiples objetivos y metas de la Agenda 2030. Gestionar los bosques de manera sostenible reporta beneficios tanto para las comunidades urbanas como para las rurales, ya que los bosques tienen funciones económicas y ambientales imprescindibles para la sociedad.

Su provisión de bienes y servicios ambientales, como la calidad del agua, está directamente relacionada con la gestión forestal. Los cambios en la cobertura, el uso y la gestión de la tierra tienen graves repercusiones en el abastecimiento de agua de un país. La dimensión económica de esa contribución para la sociedad no es capturada completamente por los sistemas de mensuración económicos en utilización.

La FAO (2018) evidencia que tres cuartas partes del agua dulce accesible del planeta provienen de cuencas hidrográficas boscosas y que las investigaciones ponen de manifiesto que el 40% de las 230 cuencas hidrográficas más importantes del mundo han perdido más de la mitad de su cubierta de árboles original. A pesar de ello, la superficie de los bosques destinados a la conservación del suelo y el agua ha aumentado a escala mundial durante los últimos 25 años y, en 2015, una cuarta parte de los bosques se gestionaba con el objetivo de conservar el suelo o el agua. Por ejemplo, los bosques nubosos del Parque Nacional La Tigra en Honduras, proporcionan más del 40% del suministro de agua a Tegucigalpa, mientras que en Ecuador el 80% de la población de Quito recibe agua potable de dos áreas protegidas (UNCCD, 2017).

El sector energético (además de la producción de agua para hidroenergía) también recibe fuerte contribución de los bosques. Alrededor de una tercera parte de la población mundial, esto es, unos 2.400 millones de personas, utiliza la madera para servicios energéticos básicos como cocinar, hervir agua y calentar las viviendas (FAO, 2018). El mismo estudio apunta que los bosques suministran aproximadamente el 40% de la energía renovable mundial en forma de dendrocombustible; esto equivale a la energía solar, la hidroeléctrica y la eólica combinadas. La atención debe ahora dirigirse a producir dendrocombustible de manera más sostenible para reducir la degradación de los bosques, así como de manera más limpia y eficiente a fin de mejorar la salud de millones de personas, en particular mujeres y niños.

La modernización del sector energético forestal tradicional ofrece la posibilidad de mejorar los medios de vida, crear cadenas de valor sostenibles y liberar recursos para realizar inversiones en la gestión forestal sostenible. En ALC, las personas que dependen de la leña y el carbón vegetal para cocinar y para esterilizar el agua corresponde a 15% de la población (FAO, 2017).

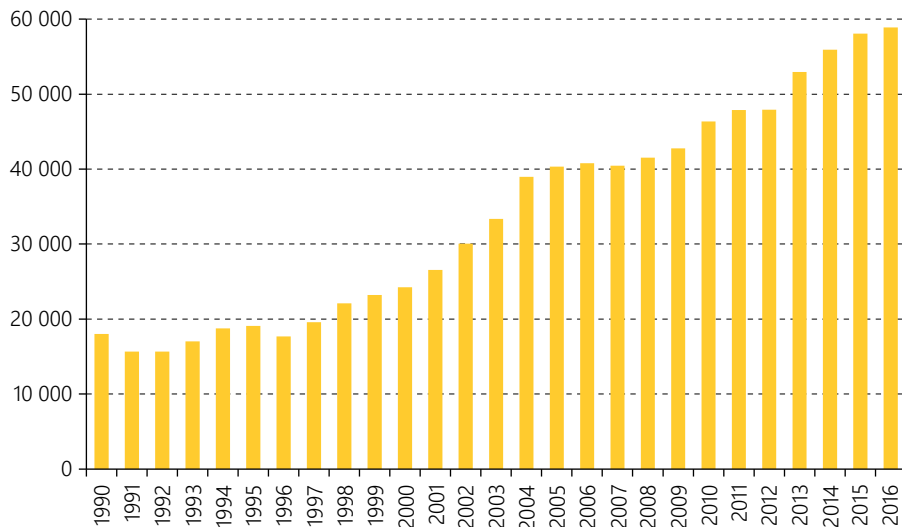
La progresiva pérdida de cobertura forestal es, por lo tanto, una fuerte amenaza al proceso económico. En términos globales, de 2001 hasta 2018 hubo un total de 361 millones de hectáreas perdidas de cobertura forestal, equivalente a un descenso de 9% en la cobertura desde el año 2000 y a 98,7 Gt de CO₂ emitidos (World Resources Institute, n.d.). En un periodo de años similar (1999-2016), ALC perdió 59 millones de hectáreas de cobertura forestal, equivalente a 6% (FAO, 2019).

Los factores impulsores de ese proceso han sido identificados por Hosonuma et al. (2012). Dos procesos inciden sobre los bosques: deforestación y degradación. La deforestación es la remoción de la cubierta forestal y conversión hacia otros usos, como la agricultura y pecuaria. La degradación de bosques se procesa por medio de la exploración de madera, por ejemplo, con pérdidas de carbono, biodiversidad y de estructura del bosque. En el caso de ALC, el agronegocio (agricultura y pecuaria) es responsable por 68% de la deforestación, siendo que la extracción de madera (muchas veces hechas de manera ilegal) es responsable por más de 70% de la degradación de bosques (Hosonuma et al., 2012). Tradicionalmente en los bosques tropicales sudamericanos, la degradación por extracción de madera es el proceso inicial de cambio de uso de suelo, seguido por la pecuaria y la agricultura comercial con tala de la cobertura (deforestación), siendo que la introducción de la agricultura comercial ocurre generalmente después que la pecuaria hizo la deforestación con tala total de la cobertura forestal (Fearnside, 2005).

En ALC, la soya ha sido el principal producto de la agricultura comercial para exportación, representando en 2017 aproximadamente el 3,6% del total de exportaciones de la región, después del petróleo (6,1%),

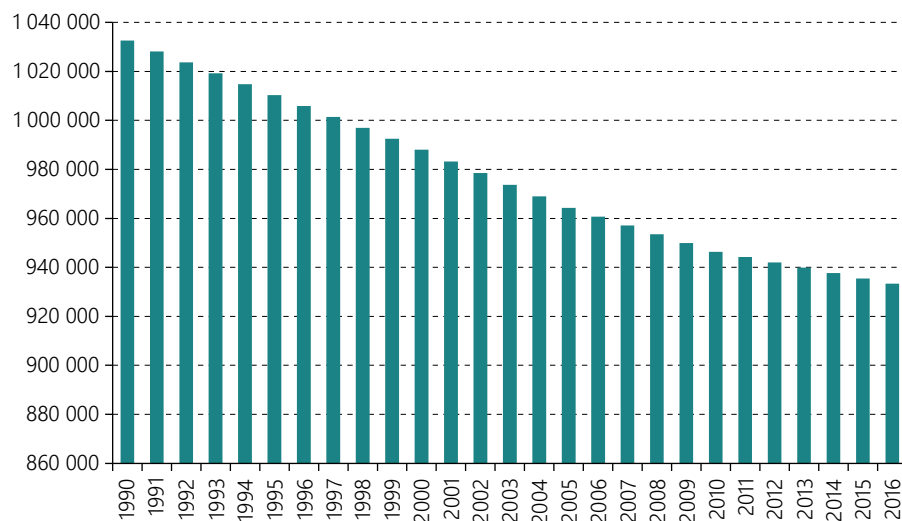
vehículos automotores (5,7%) y mineral y concentrados de cobre (3,9%) (CEPAL, 2019). Teniendo la conversión de bosques como un mecanismo de expansión —al ejemplo de otros cultivos comerciales para exportación, la evolución del área cosechada de soya ha aumentado en 40,8 millones de ha en el periodo de 1990 hasta 2016 (CEPAL, 2019) (gráfico 3), y las tierras dedicadas a pastizales permanentes (5 años o más) han aumentado en 20,6 millones de hectáreas (FAO, 2019). Al mismo tiempo, la cobertura forestal ha perdido 99,2 millones de ha en el mismo periodo (FAO, 2019) (gráfico 4).

Gráfico 3
América Latina y el Caribe: evolución de la superficie cultivada de soya
(En miles de hectáreas)



Fuente: CEPAL (2019).

Gráfico 4
América Latina y el Caribe: evolución de la cobertura forestal
(En miles de hectáreas)



Fuente: FAO (2019).

Todos los bosques y los árboles fuera de los bosques influyen en la hidrología, pero la pérdida de bosques tropicales y subtropicales puede tener una importancia desproporcionada (FAO, 2018). De investigaciones recientes se desprende que los bosques tropicales y subtropicales desempeñan un papel fundamental en el transporte de la humedad atmosférica, al proporcionar un sistema de circulación mundial que influye en la cobertura nubosa y las precipitaciones a escala regional (Ellison et al., 2017). En la cuenca amazónica este efecto recibe el nombre de “ríos voladores”. Van der Ent et al., (2010) señalaron que más del 70% de las precipitaciones de la cuenca del Río de la Plata tiene su origen en la selva amazónica. El debilitamiento de los “ríos voladores” tendrían un efecto devastador en la economía sudamericana. Análogamente, la pérdida a gran escala de estos enormes bosques tropicales contiguos se ha relacionado con la disminución de las precipitaciones regionales (Donato Nobre, 2014; Ellison et al., 2017).

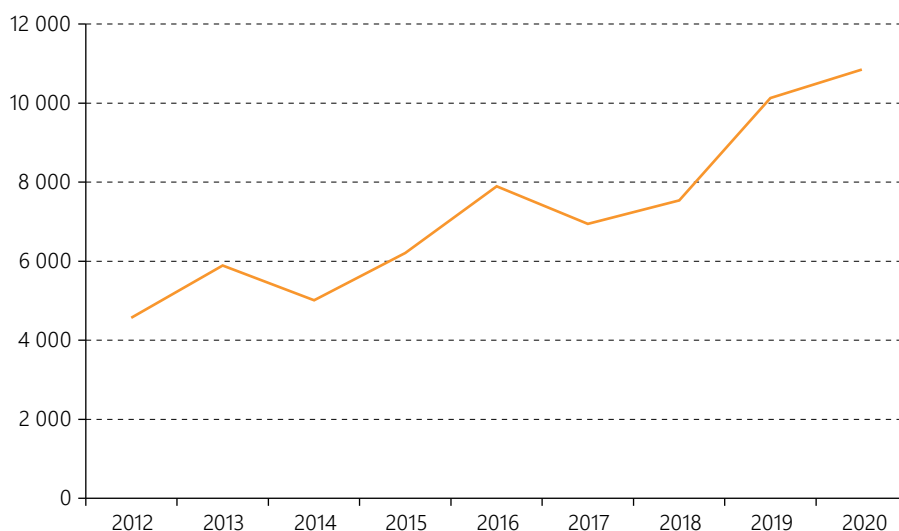
Sin embargo, el bosque tropical amazónico se deforesta más rápido. La estimación de deforestación en la Amazonía Legal brasileña para 2020 es de 11.088 km² después de llegar a 10.120 km² en 2019 (INPE, 2020). La estimación contabiliza el llamado “corte raso”, o sea, las áreas con supresión total de cobertura forestal y representa un incremento anual de 9,5% sobre el año anterior. El sistema PRODES, utilizado para medir la deforestación utiliza imágenes satelitales LANDSAT (20 a 30 metros de resolución espacial y tasa de revisita de 16 días). En el gráfico se visualiza el aumento progresivo de la deforestación en este bioma.

Una investigación conducida por relevantes organizaciones brasileñas (Instituto Centro de Vida-ICV, Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola—Imaflora y Universidade Federal de Minas Gerais—UFMG) concluyó que 94% de la deforestación en la Amazonía brasileña y en el Cerrado están asociadas a la deforestación ilegal—o sea, sin autorización de supresión de vegetación— con importantes implicaciones de riesgo económico para el mercado de *commodities*, los productores e inversionistas. Para los estados de Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Piauí y Roraima, los datos se refieren al periodo de 2018 a 2020. Reportes similares se producen en el resto de los países amazónicos.

Las altas tasas de deforestación e ilegalidad ocurren en un contexto de fuerte descenso en la abundancia de poblaciones de mamíferos, pájaros, reptiles y anfibios. De acuerdo con el índice Living Planet Index, en ALC hubo un descenso de 94% en la abundancia de especies entre 1970 y 2016 (WWF, 2020). La principal causa es la pérdida de hábitats. Importante notar que las causas subyacentes de la pandemia del COVID-19 son las mismas que conducen a los cambios climáticos y la pérdida de biodiversidad (IPBES, 2020). Entre ellas tenemos los cambios en el uso del suelo, deforestación e intensificación agropecuaria que interrumpen las interacciones naturales entre las especies y aumenta el contacto entre la fauna silvestre, los seres humanos y los patógenos, que han generado casi todas las pandemias con costos anuales globales de más de USD 1 billón (IPBES, 2020).

Otra región preocupante en términos de deforestación es el Gran Chaco, que es el bosque seco más grande de América del Sur y cubre 100 millones de hectáreas en Argentina, Paraguay, Bolivia y Brasil, con altos índices de biodiversidad. De 2000 a 2012, el Chaco argentino, paraguayo y boliviano sufrió la mayor tasa de pérdida de bosque tropical del mundo, alcanzando las 1973 hectáreas diarias en agosto de 2013 (Hansen et al., 2013). De 2010 a 2012, se desmontaron aproximadamente 1 millón y 100 mil hectáreas en estos países, tres cuartas partes de ellas en Paraguay (Cardozo et al., 2013). Desde el año 2012 hasta julio de 2018 se detectaron aproximadamente 2 millones y 925 mil hectáreas más de tierras que fueron habilitadas para cambio de uso en el Gran Chaco por deforestación. Se observaron picos de actividad en el año 2012 con 539.233 ha habilitadas y un mínimo en el año 2016 con 375.290 ha, pero en junio del 2018 aún se detectaron 33.959 ha de cambios en la cubierta natural en el Gran Chaco Americano correspondiente a un promedio de 1.095 ha/día—en ese caso con 80% del desmonte en Argentina (Arévalos et al., 2018).

Gráfico 5
Monitoreo de la deforestación del Bosque Amazónico del Brasil por el satélite: tasa PRODES Amazonía, 2012-2020
(En kilómetros cuadrados)



Fuente: INPE (2020).

B. Degradación de tierras

Nuestra capacidad para gestionar los paisajes determinará el futuro de los recursos de la tierra —el suelo, el agua y la biodiversidad— y determinará el éxito o el fracaso en la reducción de la pobreza, la seguridad alimentaria e hídrica y la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo. De hecho, se reconoce que la gestión integrada de las tierras y el agua es un acelerador para alcanzar la mayoría de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La degradación de la tierra es un fenómeno complejo, que suele implicar la pérdida de algunos o todos los factores siguientes: productividad, suelo, cobertura vegetal, biomasa, biodiversidad, servicios ecosistémicos y resiliencia ambiental (UNCCD, 2017). La degradación es comúnmente causada por la mala administración o la sobreexplotación de los recursos de la tierra, tales como la eliminación de la vegetación; el agotamiento de nutrientes; el sobrepastoreo; el riego inadecuado; el uso excesivo de agroquímicos; la expansión urbana; la contaminación; u otros impactos directos, tales como la minería, la extracción de canteras, el pisoteo o el desplazamiento de vehículos. El cambio en el uso de la tierra no es lo mismo que la degradación, y algunos cambios en el uso de la tierra pueden ser netos positivos en términos de beneficios para la humanidad. Sin embargo, en el contexto actual de la disminución de los ecosistemas naturales, junto con las crecientes presiones sobre los recursos de la tierra, el cambio en el uso de la tierra suele asociarse con la degradación que reduce la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Según la Iniciativa Economía de la Degradación de la Tierra («ELD», por sus siglas en inglés), 52% de la tierra utilizada para agricultura en nivel global está moderada o severamente afectada por degradación de suelos, con una pérdida de servicios ecosistémicos generada por la degradación que cuesta entre 6,3 y 10,6 mil millones de dólares al año, equivalente al 10-17% del PIB mundial (ELD Initiative, 2015). Estos costos se distribuyen de manera desigual, con impactos negativos que afectan principalmente a las comunidades locales y a la población rural pobre. La misma iniciativa estima en 1,4 mil millones las personas afectadas/impactadas directamente por la degradación de tierras.

En este contexto se inscribe la iniciativa para la Neutralidad de la Degradación de las Tierras (NDT) impulsada por la UNCCD, cuya finalidad es detener la actual pérdida de tierra fértil a causa de su degradación. A diferencia de enfoques pasados, la NDT establece un objetivo para la gestión de la degradación que consiste en promover una estrategia de dos vías, con medidas para evitar o reducir la

degradación de la tierra, combinadas con otras para revertir la degradación del pasado. Se trata en otras palabras de que las pérdidas se equilibren con ganancias, para alcanzar un estado donde no haya pérdida neta de tierra fértil y productiva.

En ALC, los grandes sistemas que dominan las tierras áridas, semiáridas y subhúmedas secas de la región y que cubren grandes extensiones dentro de un país o involucran los territorios de dos o más países están representados por las diversas zonas secas y desiertos de México; el corredor o arco seco centroamericano; las zonas áridas y semiáridas de la región de La Guajira en el Caribe colombiano que penetra hacia Venezuela; los llanos de Colombia y Venezuela; el Nordeste Brasileño; la región del Gran Chaco que comparten Argentina, Bolivia y Paraguay; los ecosistemas de altura en Argentina, Bolivia, Chile y Perú; las zonas áridas e hiperáridas costeras que se extienden desde el sur del Ecuador y a lo largo del Perú y hasta Chile; y la estepa patagónica en Chile y Argentina que alcanza hasta la Tierra del Fuego. En este contexto, cabe destacar incluso, las tierras semiáridas y subhúmedas secas de sistemas menores del Caribe, que, aunque poco significativas desde la perspectiva del subcontinente, si lo son en los territorios insulares; se destacan las zonas áridas y semiáridas en algunas islas de las Antillas Neerlandesas y Aruba, en La Hispaniola, en Cuba y en algunas islas menores (UNCCD, 2019).

Adicionalmente, aunque bajo una condición climática diferente, deben considerarse diversos otros sistemas que están siendo sometidos a una intensa presión por la expansión e intensificación de las actividades agropecuarias como ocurre en la cuenca amazónica, el cerrado y pastizales (campos) brasileño, la sabana uruguaya y la pampa húmeda argentina.

El Corredor Seco Centroamericano es otro ejemplo de una de las ecorregiones más susceptibles a la degradación y el cambio del clima en ALC (Banco Centroamericano de Integración Económica & FAO, 2019). Se trata de una franja de tierra de 1.600 kilómetros de largo y de 100 a 400 kilómetros de ancho que cubre las tierras bajas de la zona costera del Pacífico y la mayor parte de la región de la precordillera central de Chiapas (en México), Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua, así como la provincia de Guanacaste en Costa Rica, y el Arco Seco de Panamá. Es una ecorregión de bosque tropical seco que cubre casi un tercio del territorio de América Central y se caracteriza por presentar periodos de canícula o lluvias intensas, exacerbados bajo la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). En este extenso territorio habitan más de 45 millones de habitantes, de los cuales un 40% vive en zonas rurales. La pobreza afecta a más de la mitad de los habitantes de la región y aproximadamente un 20% se encuentra en pobreza extrema. Se estima que alrededor del 10% de la población en la región sufre de subalimentación, especialmente en periodos de emergencia y rehabilitación ante las recurrentes sequías e inundaciones con sus respectivas consecuencias en los medios de vida y el desarrollo de los países (Banco Centroamericano de Integración Económica & FAO, 2019).

Para evaluar el grado de degradación de tierras en ALC —y orientar las políticas públicas en nivel nacional y regional— el desarrollo de un único indicador o índice para representar o cartografiar dicha degradación supone un gran desafío. United Nations Convention to Combat Desertification (2019) utilizó la metodología de evaluación de la degradación de tierras del Atlas Mundial de la Desertificación (Cherlet et al., 2018), que se basa en un marco sistemático que ofrece una “suma de pruebas” sobre las interacciones del ser humano con el medio ambiente y es adecuada a la realidad de ALC. Esto permite identificar vías temáticas y patrones geográficos de procesos coincidentes que potencialmente pueden contribuir a la degradación de la tierra. Ni las tendencias decrecientes de la productividad implican de por sí una degradación de la tierra ni las tendencias crecientes una recuperación.

De esa manera, United Nations Convention to Combat Desertification (2019) analizó para ocho países de ALC, las principales variables que pueden incidir sobre la degradación de las tierras. México, Guatemala, República Dominicana, Ecuador, Perú, Paraguay, Brasil y Argentina fueron los países analizados. Para realizar el análisis se procesaron las bases de datos con las cuales se construyó el Mapa Mundial de la Desertificación (Cherlet et al., 2018), siguiendo la metodología allí desarrollada y que se denomina Análisis de Convergencia de Variables Relevantantes. Las variables que se consideran para el análisis son las siguientes; Carbón Orgánico en el Suelo, Aridez, Estrés hídrico, Declinación de la Productividad Primaria, Cambio de Cobertura del Suelo y Deforestación, más todas las combinaciones posibles entre ellas, que son 64 en total. Todas las variables indicadas están en series históricas de al menos diez años y con una resolución de 1 km².

No obstante, las diferencias entre países y a su interior, ALC tiene muchas características compartidas y similitudes en sus procesos de degradación de las tierras. En todos los países, el área degradada es una proporción significativa del territorio nacional y en todos los casos las principales variables que inciden en este proceso se repiten con gran frecuencia. La deforestación está presente en todos los países, tanto como variable individualmente considerada, como combinada con otras. Otro tanto se observa respecto de los suelos con bajo contenido de carbono y con declinación de la productividad, aunque en menor escala. En buena parte de los países aparece la variable aridez, que en los casos de México y Perú adquiere mayor importancia que el resto. El cuadro 3 presenta un resumen de las características más relevantes de los países analizados, extraídos de la mencionada base de datos satelitales, señalándose para cada uno de ellos, las variables de degradación que más frecuentemente inciden sobre el territorio, así como también los Departamentos o Provincias más afectados.

Cuadro 3
Degradación de tierras en países seleccionados como porcentaje del territorio y sus factores de degradación

País	Estimación de Degradación <i>(En porcentajes del territorio)</i>	Principales factores de degradación	Territorios más afectados
México	32,9	Estrés hídrico, aridez, deforestación y bajo contenido de carbono en el suelo.	Baja California Sur, Chihuahua, Sonora, Guanajuato y Zacatecas.
Guatemala	55,6	Deforestación y declinación de la productividad.	Petén, Alta Verapaz, Chiquimula.
República Dominicana	59,9	Deforestación, estrés hídrico y bajo contenido de carbono en el suelo.	Provincias de Monseñor Nouel, Santiago, La Vega y Samaná.
Brasil	36,0	Deforestación, declinación de la productividad y bajo contenido de carbono en el suelo.	Estados de la región Norte vinculados la Amazonía y al Cerrado.
Argentina	40,0	Declinación de la productividad, aridez, bajo contenido de carbono en el suelo y cambio de cobertura.	Provincias de Santa Cruz, San Luis y Santa Fe.
Paraguay	62,3	Deforestación, menor productividad, cambio de cobertura vegetal, aridez y pérdida de productividad.	Departamentos de San Pedro, Ñeembecú, Guairá, Caaguazú y Alto Paraná.
Perú	58,1	Deforestación, aridez, estrés hídrico y bajo contenido de carbono en el suelo.	Departamentos de Ucayali, Pasco y Callao, Madre de Dios, Apurímac y Moquegua.
Ecuador	49,9	Deforestación, bajo contenido de carbono en el suelo y cambio de la cobertura vegetal.	Provincias de la región Oriente (Morona Santiago, Sucumbios, Orellana, Zamora Chinchipe y Napo).

Fuente: Elaboración propia con base a United Nations Convention to Combat Desertification (2019).

Es importante resaltar la relación entre los altos niveles de degradación y la productividad de las tierras. En el caso de los pastizales degradados de Brasil, por ejemplo, Strassburg et al. (2014) demostraron que un uso más sostenible de estas tierras podría cubrir el aumento previsto de la demanda de carne, cultivos, madera y biocombustibles al 2040, sin la utilización de nuevas áreas y recuperando las actuales. Concluyeron que la productividad actual está al 32-34% de su potencial y que una intensificación sostenible podría elevar dicha productividad al 49-52% proporcionando un suministro adecuado de estos bienes hasta al menos el año 2040, sin que ello implique una mayor degradación de tierras o ecosistemas y con notables beneficios para el almacenamiento de carbono. Aún identificaron que, si la recuperación de pastizales degradados se profundice, elevando la productividad a 70% de su potencial, 36 millones de hectáreas podrían ser liberados de la producción.

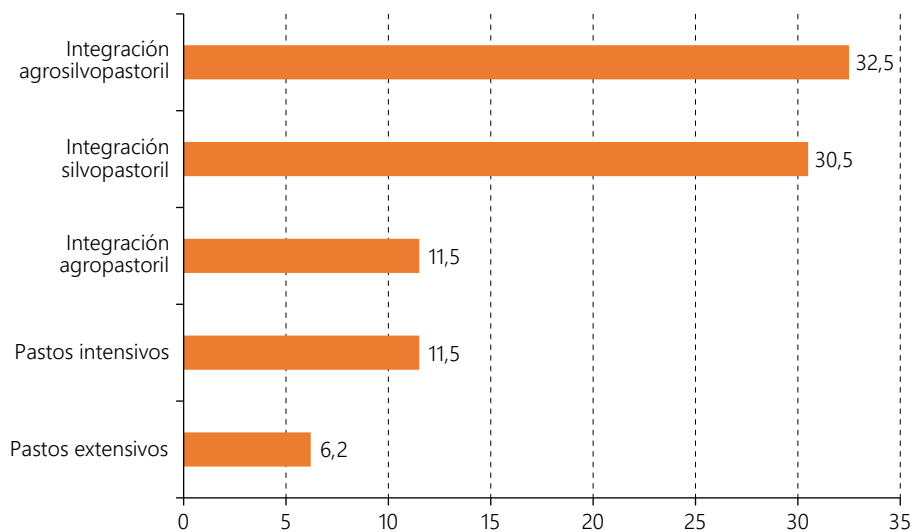
Con nuevos métodos de producción sostenible, la producción agropecuaria puede, de hecho, funcionar en un sentido contrario de lo que ha hecho hasta ahora: puede reducir emisiones, agregar carbono al suelo y recuperarlo, agregando valor y productividad al mismo tiempo.

Entre los métodos ya evaluados económica y ambientalmente, están los sistemas silvopastoriles, que son arreglos agroforestales que combinan plantas forrajeras, gramíneas y leguminosas, con arbustos y árboles para la alimentación animal y otros usos complementarios (Chará et al., 2019). Estos sistemas productivos permiten la intensificación de la producción basados en procesos naturales, siendo considerado un uso de la tierra más sostenible que el convencional. Las interacciones ecológicas aumentan la productividad, la eficiencia, la provisión de servicios ambientales y, finalmente, el rendimiento económico de las propiedades. Concurrer directamente al aumento de ingresos por las ventas de madera, animales, productos animales y productos agrícolas, e indirectamente se suman los beneficios de la conservación del suelo, provisión de servicios ambientales, provisión de abrigo a los animales y la mejoría de su bienestar (Peri et al., 2016). Cambios en esa dirección serán necesarios en toda la cadena productiva rural apuntando a una nueva ruralidad —en especial en nuestra región que tiene en los bienes agropecuarios un fuerte componente de la economía y de las exportaciones. Los sistemas integrados agrosilvopastoriles tienen, por lo tanto, un rol relevante en el futuro de las cadenas productivas rurales.

(Chará et al., 2019), resalta que los beneficios aparecen en la forma de forrajeras de mejor calidad, reduciendo la necesidad de suplementación de fuentes externas y aumentando hasta 4 veces el número de cabezas de ganado por hectárea. Además, se provee el aumento de absorción de carbono en el suelo y en las plantas; mejor disponibilidad de nutrientes por la mejoría de las condiciones del suelo y más fijación de nitrógeno; mejoría de la capacidad de infiltración del agua y regulación del ciclo hidrológico; aumento de la biodiversidad de aves e insectos mejorando la polinización y control de plagas. Distintos nombres se utilizan en la literatura para identificar las variaciones en el método, pero los más comunes son sistemas agrosilvopastoriles, integración silvopastoril e integración agricultura-pecuaria, dependiendo de las características de cada iniciativa.

De la misma manera, Oliveira et al. (2018) evaluaron el secuestro de carbono en distintos sistemas productivos de ganado de corte (gráfico 6) en el sudeste de Brasil, en área homogénea desde el punto de vista de relieve y edáfico, donde se percibe una mayor incorporación de carbono en los suelos y plantas en los sistemas integrados.

Gráfico 6
Carbono secuestrado en distintos sistemas de producción de bovinos de corte en Brasil
(En tonelada de CO₂ equivalente/hectárea/año)



Fuente: Elaboración propia con base a Oliveira et al. (2018).

Una experiencia intensificación agropecuaria de larga escala en Brasil también debe ser analizada, por su dimensión y potenciales de cambio en el sistema productivo. Se trata del Plan ABC-Agricultura de Bajo Carbono (Observatório ABC, 2017). La recuperación de pastizales e implantación de sistemas integrados, 15 + 4 millones de hectáreas respectivamente, permiten aumento en la eficiencia del uso de la tierra y de la productividad. Este cambio permitiría, con base a los resultados hasta el momento, reducir hasta 1,4 millones de hectáreas en culturas vegetales y entre 4 a 5 millones de hectáreas en pastizales, los cuales podrían ser retirados del sistema de producción, permitiendo la recuperación de bosques. Este aumento en la productividad también es revelado en el aumento de la carga animal por hectárea. Mientras en que las áreas degradadas la tasa es de 0,7 UA/ha, en las áreas recuperadas es de 1,5 UA/ha y en las áreas con integración silvopastoril son de 2,5 UA/ha.

Finalmente, mientras políticas con enfoque en restauración forestal y recuperación de áreas degradadas no son aplicadas en escala masiva, la población viviendo en áreas degradadas suele aumentar. Entre 2000 y 2010 se registró (Barbier & Hochard, 2016) un aumento de 12,4% de personas que viven en áreas degradadas en nivel mundial, mientras que en ALC ese aumento fue de 18,4%, solo atrás del aumento de poblaciones en áreas degradadas en la África Subsahariana (cuadro 4). Barbier & Hochard (2016) estimaban para el año 2000 una población de 1,33 mil millones viviendo en áreas degradadas, de las cuales 1,26 mil millones en países en desarrollo.

No hay duda de que la alta concentración de población en áreas degradadas es un fuerte obstáculo a la reducción de la pobreza y al crecimiento económico en países en desarrollo, una vez que la persistente degradación de tierras reduce la productividad de los sistemas agrícolas de los cuales dependen los pobres en áreas rurales.

Cuadro 4
Personas que viven en tierras agrícolas degradadas (TAD) como porcentajes de la población rural

Región	Población Rural en TAD, año 2000	Variación 2000-2010 de la población rural en TAD
Mundo	34,0	+12,4
Países desarrollados	17,9	-2,8
Países en desarrollo	32,4	+13,3
América Latina y el Caribe	13,0	+18,4
Asia Oriental y el Pacífico	50,8	+8,4
Europa y Asia Central	38,5	+1,0
Oriente Medio y África del Norte	22,3	+14,3
Asia del Sur	26,2	+17,8
África Subsahariana	20,6	+37,8

Fuente: Elaboración propia con base a (Barbier & Hochard (2016).

C. Una recuperación económica post-pandemia resiliente y de bajo carbono

De manera general, según el IPCC (IPCC, 2018), tanto la meta de 1,5°C como la de 2°C requerirán que alcancemos cero emisiones netas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) alrededor de 2050 y con fuertes reducciones a 2030. Cero emisiones netas significan que las emisiones de CO₂e antropogénicas se equilibren globalmente con la eliminación de CO₂ antropogénico mediante actividades de captura de CO₂e como la forestación.

Por lo tanto, teniendo en mente las fuertes reducciones requeridas para el 2030, una recuperación económica con los mismos efectos ambientales que teníamos antes de la pandemia nos conducirá a

una profundización de las crisis climática e hídrica, con reflejos de largo plazo en nuestra capacidad de mantener el proceso económico y social saludable y productivo. En otras palabras, estaríamos saliendo de una crisis para entrar en otra de carácter aún más global, de muchísimo más largo plazo y de impactos mucho más duraderos y deletéreos. Luego, la recuperación económica debe centrarse en los sectores de bajo carbono y que generen al mismo tiempo empleos y resiliencia ambiental, fortaleciendo la capacidad social de generar prosperidad. ¿Cómo respondemos regionalmente a esos desafíos?

América Latina y el Caribe posee una parte significativa de la riqueza natural del planeta, siendo que su economía y sus exportaciones son ampliamente dependientes de esa base de recursos naturales. Al mismo tiempo, el futuro de la economía regional y la capacidad de la región en lidiar con las desigualdades y con el crecimiento económico, dependerán no solo de la mantención de su conjunto de recursos naturales y servicios ambientales, pero también de la recuperación de la capacidad productiva de los recursos ya degradados, o sea, aumento de la resiliencia. Políticas públicas efectivas de manejo de sectores económicos de bajo carbono serán, por lo tanto, clave para garantizar nuevo ciclo de desarrollo, crecimiento y empleo en la región para la recuperación post pandemia.

Es importante también notar la alta dependencia que los empleos tienen de la base de recursos naturales. Aproximadamente 64 millones de empleos en ALC (el 19% del empleo) dependen directamente de servicios ecosistémicos. La agricultura y la ganadería, así como el procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco, son los sectores con mayor número de trabajadores que dependen de los servicios ecosistémicos (con más de 40 millones y 10 millones de trabajadores, respectivamente). Otros sectores que también dependen del entorno natural son la fabricación de textiles, productos químicos y papel, así como el turismo ambiental (CEPAL & OIT, 2018). Esto indica que la mantención y recuperación de la base material/natural de la economía es fundamental en la recuperación económica.

El BID profundiza el tema de empleos en un futuro de cero emisiones netas en América Latina y el Caribe (Saget et al., 2020), utilizando el escenario de descarbonización que se basa en el escenario “por debajo de 2°C”² que publicó la IEA en 2017 (IEA, 2017). Dicho escenario pondría al mundo en el camino hacia cero emisiones netas de carbono para 2060 y contribuiría a la estabilización del clima al nivel de 1,75 °C por encima de los niveles preindustriales, que es el punto medio del rango meta del Acuerdo de París. El escenario de altas emisiones —que utilizamos como referente para la comparación— se basa en el “Escenario de tecnología de referencia” (RTS) de la IEA en la misma publicación, en el que las emisiones mundiales de carbono, en lugar de disminuir, aumentan un 15% en comparación con los niveles actuales para 2040.

De acuerdo al BID, las cifras confirman que la descarbonización puede crear empleos netos. Las simulaciones muestran que, en comparación con el escenario de altas emisiones, las emisiones de GEI se reducen en un 35% y se crean 15 millones de puestos de trabajo para 2030 (lo que representa el 4% del empleo total en la región). Los empleos netos ocultan a los ganadores y a los perdedores. El escenario de descarbonización cuenta con 22,5 millones de puestos de trabajo más en los sectores de alimentación de origen vegetal, construcción, manufactura, energía eléctrica renovable y silvicultura, y con 7,5 millones menos de empleos en los sectores de alimentación de origen animal, minería y extracción de combustibles fósiles, y generación de electricidad basada en combustibles fósiles.

La agricultura más sostenible domina la creación de empleo. El sector emplea a 19 millones de personas más, equivalentes a tiempo completo en 2030 en el escenario de descarbonización que en el de altas emisiones, lo que implica un aumento del 54% con respecto al escenario de altas emisiones.

Cabe destacar que se subestima el número de puestos de trabajo que se podrían crear en el sector de la silvicultura en un escenario de descarbonización. De hecho, esto se basa en la intensidad de mano de obra típica del trabajo forestal existente en la región. Pero los esfuerzos de reforestación serían mucho más intensivos en mano de obra que la actual explotación de los bosques. Por ejemplo, si los países plantaran bosques a gran escala como una medida de recuperación verde, se podrían crear muchos más empleos a corto plazo.

En conclusión, la descarbonización de la economía, en un proceso de recuperación transformadora, podría ser un verdadero motor de reactivación económica al tiempo que promueve una economía de bajo carbono y resiliente, evitando así nuevas crisis futuras y superando los efectos negativos de las crisis del COVID-19. Por lo tanto, en el sentido de desarrollar una transición inteligente hacia la sostenibilidad como base para un nuevo ciclo de desarrollo económico en ALC, es necesario considerar las interrelaciones entre los sistemas productivos y sus bases de recursos naturales en las distintas áreas geográficas. A partir de ese análisis, y tomando en cuenta la realidad inmediata de la pandemia COVID-19, se necesitará planeamiento de la transición, promoviendo cambios progresivos de manera a superar las barreras iniciales, articular los actores fundamentales y crear círculos/flujos virtuosos con beneficios crecientes.

Los paquetes de recuperación económica post pandemia deben contemplar condicionalidades de cambio del sistema productivo agropecuario en ALC hacia la integración de la producción agrosilvopastoril. La degradación de bosques, tierras y recursos hídricos merman los potenciales de desarrollo económico y profundizan la desigualdad. La provisión de bienes y servicios ambientales, como la provisión de agua, están directamente relacionadas con la gestión sostenible de bosques y tierras. El desafío que se impone en ALC es construir procesos de producción agropecuaria sostenibles, una vez que la degradación afecta a la productividad y los empleos y, por ende, a la economía regional.

IV. Medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono: técnicas y fundamentos

Recientes evaluaciones realizadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021; 2018) indican que la RDC a gran escala es necesaria en todas las trayectorias para limitar el calentamiento global a 1,5-2°C con un rebasamiento limitado o nulo. En este capítulo se describen las principales técnicas de RDC recogidas en la literatura científica. Se estudian las virtudes y debilidades de cada uno de ellos y se discuten las cuestiones socioeconómicas y de gobernanza pertinentes para estas intervenciones a gran escala.

A. Contexto general sobre las RDC

El IPCC define a las RDC como “las actividades antropogénicas que remueven el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan de forma duradera en depósitos o en productos” (IPCC, 2018). También se conoce como remoción de carbono, reducción de carbono o remoción de CO₂ antropogénico. Las tecnologías de emisiones negativas (NETS, por sus siglas en inglés) y la remoción de gases de efecto invernadero (RGEI) son términos que engloban la RDC, pero que también incluyen otros gases de efecto invernadero como el metano. Cabe señalar que actualmente no existen métodos bien desarrollados para la remoción de los GEI que no sean CO₂.

A menudo se confunde a la RDC con la captura y almacenamiento de carbono (CAC). La CAC consiste en capturar las emisiones de CO₂ en su origen (por ejemplo, en una central eléctrica de combustibles fósiles) y almacenarlas de forma duradera. Si la captura se conecta a una central eléctrica de combustibles fósiles, podría considerarse parte de la reducción de emisiones evitando que se liberen nuevas emisiones a la atmósfera. Por lo tanto, la CAC impide que crezca el volumen de CO₂ en la atmósfera, mientras que la RDC remueve el CO₂ que ya se ha emitido, reduciendo el volumen total de CO₂ en la atmósfera.

Las técnicas de RDC pueden utilizar una serie de enfoques diferentes para remover y almacenar el carbono. Algunos utilizarían técnicas de ingeniería para remover el carbono directamente del aire que nos rodea, otros utilizarían una combinación de sistemas naturales junto con la ingeniería y otros utilizarían enfoques basados en la naturaleza, por ejemplo, plantaciones de árboles o el cambio de las prácticas de gestión del uso del suelo para mejorar la captación de carbono.

B. ¿Por qué se debería discutir sobre el despliegue de las RDC?

Siete años después de la entrada en vigor del Acuerdo de París sobre el cambio climático (UNFCCC, 2015), se reconoce cada vez más, sin una rápida aceleración de la acción, que no será posible limitar el aumento de la temperatura media mundial a 1,5-2°C. De hecho, la Organización Meteorológica Mundial considera que hay un 40 % de posibilidades de que la temperatura media anual del planeta alcance 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales al menos durante uno de los próximos cinco años (WMO, 2021), lo que supone un riesgo importante para los sistemas naturales y humanos y para nuestra capacidad de lograr un desarrollo sostenible (IPCC, 2018).

Los avances hacia la consecución de los objetivos del Acuerdo de París han sido lentos. Incluso si se alcanzaran los objetivos de todas las actuales contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN) en el marco del Acuerdo de París, se espera que la Tierra se caliente 3 °C para finales de siglo (rango de 3,0 a 3,5°C con un 66% de probabilidad).

Esta incapacidad colectiva para responder adecuadamente al calentamiento global se refleja en las trayectorias de emisión presentadas en el Informe Especial del IPCC sobre el Calentamiento Global de 1,5 °C (IPCC, 2018). Todos ellos requieren la remoción de CO₂ de la atmósfera mediante la RDC, si se quiere limitar el calentamiento a 1,5 °C. Estos escenarios indican la necesidad de remover entre 100 000 millones y 1 billón de toneladas (Gt) de CO₂ para el año 2100 (IPCC, 2018), lo que demuestra la necesidad de una acción global rápida y sin precedentes. En el informe más reciente del IPCC, sólo dos de los cinco escenarios evaluados indican la posibilidad de limitar el aumento de la temperatura media mundial a 1,5-2 °C, y ambos se basan en la reducción de emisiones por transformación y en la RDC para alcanzar las emisiones netas iguales a cero y, posteriormente, negativas netas (IPCC, 2021). Es en este contexto en el que se proponen cada vez más opciones de RDC, pero remover y almacenar permanentemente el CO₂ no es una idea nueva, sino que está integrada en los acuerdos climáticos mundiales desde al menos 1992, cuando la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) estableció que la mitigación incluía tanto la reducción como la remoción de las emisiones (ONU, 1992). Lo que es nuevo es la escala y el ritmo con el que se exigen ahora estas remociones para evitar un calentamiento de 1,5-2 °C (IPCC, 2021; Mace et al., 2021).

Si alguna vez se implementaran las medidas y tecnologías de RDC a una escala de varias gigatoneladas, se esperaría que tuviera efectos de enfriamiento del clima, pero solo tangibles entre décadas. Estos efectos se modelan en las trayectorias de IPCC (IPCC, 2021; 2018). Si se consiguieran y mantuvieran las emisiones netas de CO₂ a nivel mundial, el aumento de la temperatura global en superficie se invertiría gradualmente, pero otros cambios climáticos (como el aumento del nivel del mar) continuarían en su tendencia actual durante décadas o milenios (IPCC, 2021).

Muchas de las técnicas exploradas en este capítulo son teóricas o se encuentran en fases muy tempranas de desarrollo y, a menos que la RDC asequible y aceptable desde el punto de vista medioambiental y social sea factible y esté disponible a escala mucho antes de 2050, será difícil hacer realidad las trayectorias coherentes con los 1,5 °C (IPCC, 2018). Sigue habiendo considerables incertidumbres sobre muchas de las técnicas en lo que respecta, por ejemplo, a su potencial de remoción de carbono a lo largo del tiempo, a los posibles impactos a escala climática que puedan tener y a los probables costos medioambientales, sociales y económicos de su implantación. Estas incertidumbres se ven agravadas por las decisiones divergentes de los investigadores en relación con una compleja serie de factores que incluyen, por ejemplo, las decisiones sobre las probables estrategias de adaptación futuras, las opciones de escenarios de cambio climático, los plazos de innovación, los costos de oportunidad y el descuento de los costos de innovación futuros. Todo ello puede afectar a los resultados de sus evaluaciones. A la espera de que se realicen más investigaciones, a través de las cuales se pueda disponer de evaluaciones más rigurosas, en este capítulo se reconocen estos retos y, por lo tanto, se proporcionan rangos de costos, posibilidades de remoción (secuestro) de carbono y otros factores para cada técnica, reflejando las pruebas de la literatura actual. Las técnicas se resumen en el cuadro 5.

Cuadro 5
Resumen de las técnicas de RDC^a

Técnica	Rango de capacidad de secuestro teórico (Gigatoneladas/año)	Costo estimado en dólares por tonelada de CO ₂ secuestrada	Permanencia de secuestro	Preparación	Área de investigación activa	Marco de gobernanza	Aceptabilidad social ^b	
Forestación y reforestación	Plantación de bosques y recuperación de ecosistemas que generan el almacenamiento a largo plazo de carbono.	1-18 Gt.	De 15 a 30 USD aunque el IPCC da un rango de 5 a 50, pero solo para la reducción.	A medio plazo.	Ya ampliamente practicado. Podría implementarse a escala con poco desarrollo adicional.	Sí. Exploración de los flujos de gases procedentes de los árboles, efectos del cambio de uso del suelo y cambios en el albedo.	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), Protocolo de Kioto, Acuerdo de París, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés). Quedan preguntas sobre la justicia social (es decir, cuestiones sobre el uso de la tierra). Un requisito para una mejor supervisión, verificación y notificación.	Las demandas de uso del suelo que compiten entre sí necesitan una gobernanza. La falta de incentivos financieros para fomentar la forestación.
Afloramiento artificial	Bombeo de aguas oceánicas desde aguas profundas para mejorar la captación de carbono.	Potencialmente contraproducente en algunas circunstancias y no más de un máximo de 20 Gt para 2100.	Desconocida.	A largo plazo.	Actualmente no es práctico, ni siquiera en principio en términos de ingeniería, suministrar refrigeración.	Actividad de investigación limitada que explora los desafíos de la ingeniería.	Sin resolver.	Desconocido.

	Técnica	Rango de capacidad de secuestro teórico (Gigatoneladas/año)	Costo estimado en dólares por tonelada de CO ₂ secuestrada	Permanencia de secuestro	Preparación	Área de investigación activa	Marco de gobernanza	Aceptabilidad social ^b
Biocarbón	La quema de biomasa en condiciones de bajo oxígeno (pirólisis) crea un "biocarbón" que luego se agrega al suelo para mejorar los niveles de carbono del mismo.	De 0,3 a 35 Gt.	De 18 a 166 USD.	A largo plazo.	Una técnica bien establecida con un mercado en evolución.	Sí, exploraciones de las tasas de descomposición y la relación con la materia prima y la temperatura.	Derecho estatal y consuetudinario, CMNUCC y FAO. Se requieren mejores informes, supervisión y verificación (MRV, por sus siglas en inglés). Un comercio transfronterizo de biocarbón puede requerir un acuerdo internacional sobre la asignación de créditos de carbono.	No hay grandes preocupaciones sociales.
Bioenergía con captura y almacenamiento de dióxido de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés)	La materia prima se quema produciendo energía o calor. A continuación, se capturan los gases liberados por la combustión.	De 1 a 85 Gt.	De 65 a 240 USD, aunque la mayoría de los costos son inferiores a 200 USD.	Dependiendo de la ubicación-potencialmente permanente.	Una tecnología establecida.	Sí, análisis de sistemas completos, producción de materias primas y técnicas de combustión.	Sin resolver. La CMNUCC, el Acuerdo de París y la FAO. Compensaciones por el uso del suelo. Un requisito para mejorar los MRV del secuestro logrado.	Las cuestiones relativas al cambio de uso del suelo pueden crear tensiones.
Secuestro de carbono en suelos	Cambios en la gestión de la tierra que aumentan la concentración de carbono en el suelo.	De 1 a 11 Gt.	12 USD.	De medio a largo plazo.	No hay barreras significativas. Conocimiento limitado de la técnica en la comunidad agrícola.	Sí. Se requiere una mejor comprensión de los flujos de gas del suelo mejorado.	La CMNUCC y el Acuerdo de París, la FAO y la iniciativa 4p100. Un requisito para mejorar los MRV del secuestro logrado.	No hay grandes preocupaciones sociales.

Técnica	Rango de capacidad de secuestro teórico (Gigatoneladas/año)	Costo estimado en dólares por tonelada de CO ₂ secuestrada	Permanencia de secuestro	Preparación	Área de investigación activa	Marco de gobernanza	Aceptabilidad social ^b	
Secuestro en océanos de carbono de residuos de cultivos	Los residuos de los cultivos y la biomasa se recogen y se depositan en el océano para que se hundan.	Hasta 1 Gt.	Incierto.	A largo plazo.	No hay limitaciones técnicas para la implantación. Se requiere una ampliación y un desarrollo de las infraestructuras.	No es un área de investigación activa. Se necesitan más pruebas sobre el impacto medioambiental.	Cubierto por el Protocolo de Londres y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB).	No se sabe cómo respondería el público a esta técnica.
Captura directa de dióxido de carbono del aire y almacenamiento (DACCS, por sus siglas en inglés)	Procesos químicos que separan el CO ₂ del aire para su posterior almacenamiento.	De 0,5 a 5 Gt (para 2050).	De 20 a 1 000 USD.	Dependiendo de la ubicación-potencialmente permanente.	No hay limitaciones técnicas para la implantación aparte de la ampliación y el suministro/uso de energía.	Sí. Proyectos de demostración que mejoran la eficiencia energética, térmica y del agua. Es necesario elaborar modelos para entender la ampliación.	Con enmiendas puede ser relevante para la CMNUCC, el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París.	No se sabe cómo respondería el público a esta técnica.
Mejora de la alcalinidad de los océanos	La alcalinidad adicional en las superficies oceánicas aumentará la absorción de CO ₂ .	3500 Gt.	De 50 a 450 USD.	Permanente.	Reducción de la huella de carbono y energía necesaria.	Muy limitada.	Se sometería a la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CNUDM) y el Protocolo de Londres en el futuro, si se menciona en el anexo 4 CDB.	Las escasas investigaciones sobre técnicas ampliamente similares sugieren que es poco probable que sea bien recibida.

	Técnica	Rango de capacidad de secuestro teórico (Gigatoneladas/año)	Costo estimado en dólares por tonelada de CO ₂ secuestrada	Permanencia de secuestro	Preparación	Área de investigación activa	Marco de gobernanza	Aceptabilidad social ^b	
	Meteorización terrestre reforzada	Adición de minerales a la tierra que reaccionan con la atmósfera y remueven el carbono.	De 0,72 a 92 Gt.	De 15 a 3 460 USD.	Permanente.	No hay limitaciones técnicas para la implantación.	Sí. Investigación limitada en curso.	Sujeto a la legislación del estado nacional. Puede ser relevante para la CMNUCC, el Protocolo de Kioto, el Acuerdo de París y el Protocolo de Londres.	Pruebas limitadas sobre la respuesta del público a esta técnica.
	Cultivo de macroalgas	Cultivo intensivo de microalgas. Con una cobertura global del 9 % se podrían capturar 12 Gt al año de metano biológico digerido. Si se quema para obtener energía, con captura de gas, se puede capturar un máximo de 34 Gt equivalentes.	No disponible.	Con una CAC sólida, potencialmente a largo plazo.	Tecnologías ya fácilmente disponibles. El desarrollo puede ser necesario para maximizar la captura y el uso de metano y CO ₂ .	Sí. Investigación limitada en curso.	Depende de la ubicación del cultivo que podría estar dentro de aguas cerca o lejos de la costa.	Como método de cultivo existente, la proliferación de la técnica puede plantear retos insuperables.	
	Captura y almacenamiento de carbono en el océano (occs)	La remoción química del carbono inorgánico disuelto que se lleva a los lugares de almacenamiento.	Incierto.	No disponible.	A largo plazo.	Los principios se entienden bien. La investigación en ingeniería química es necesaria antes de que una tecnología viable esté disponible para su aprobación.	Modelos principalmente técnicos y económicos.	Si se lleva a cabo en aguas de la ZEE, la OCCS estaría sujeta a las condiciones del estado nacional. En alta mar, el almacenamiento de CO ₂ bajo el lecho marino estaría cubierto por el Protocolo de Londres.	No hay pruebas que indiquen la naturaleza y la magnitud de las respuestas.

	Técnica	Rango de capacidad de secuestro teórico (Gigatoneladas/año)	Costo estimado en dólares por tonelada de CO ₂ secuestrada	Permanencia de secuestro	Preparación	Área de investigación activa	Marco de gobernanza	Aceptabilidad social ^b
Fertilización de los océanos	La colocación de hierro en el agua superficial del océano favorece el crecimiento del plancton, que absorbe CO ₂ durante su crecimiento.	El IPCC incluye estimaciones de hasta 4,4 Gt, mientras que otras evaluaciones posteriores sugieren 3,7 Gt.	De 2 a 457 USD.	A largo plazo.	Técnicamente factible y buen conocimiento de la infraestructura industrial necesaria.	Sí. Impacto medioambiental y capacidad de absorción de CO ₂ .	Investigación abordada en el marco del Protocolo de Londres y de la CNUDM. El CDB.	Las investigaciones limitadas sugieren que no es bien recibida.
Fertilización de los océanos con macronutrientes	La colocación de nutrientes en el agua superficial del océano favorece el crecimiento del plancton, que absorbe CO ₂ durante su crecimiento.	Incierto.	20 USD.	A largo plazo.	Técnicamente factible y buen conocimiento de la infraestructura industrial necesaria.	Sí. Impacto medioambiental y capacidad de absorción de CO ₂ .	Investigación abordada en el marco del Protocolo de Londres y de la CNUDM. El CDB.	Las investigaciones limitadas sugieren que no es bien recibida.
Recuperación de humedales	Rehumectación y recuperación de humedales, por ejemplo, turberas para mejorar el almacenamiento de carbono.	1,2 Gt.	De 10 a 100 USD aunque no se dispone de los costos por tonelada de restauración de agua salada.	A medio plazo.	Requiere poca tecnología nueva.	Sí. Reducción de la emisión de metano y su captura.	La CMNUCC, el Protocolo de Kioto, el Acuerdo de París, la Convención de Ramsar sobre los Humedales y la FAO. Compensaciones por el uso del suelo. Se requieren mejores informes, supervisión y verificación.	Un obstáculo clave puede ser la falta de incentivos financieros para fomentar el cambio de uso del suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Clave: a medio plazo-varias décadas; a largo plazo-varios siglos.

^a Existe una considerable incertidumbre con respecto a la capacidad de remoción potencial y los costos que reflejan una amplia gama de supuestos de implantación teórico y de modelos (IPCC, 2018). Esta información debe tratarse con cautela a la espera de evaluaciones comparativas más rigurosas que pueden estar disponibles si se madura la comprensión de las técnicas. En el siguiente texto se analizan las incertidumbres en las evaluaciones.

^b Es importante señalar que la mayoría de las pruebas de investigación relacionadas con la aceptabilidad social se basan únicamente en ciudadanos europeos o norteamericanos.

Además de las incertidumbres sobre las técnicas de RDC, existe un debate considerable sobre la idoneidad de la gobernanza disponible tanto para la RDC en general como para cada una de las técnicas individuales. Florin et al. (2020) han elaborado panorámicas en profundidad sobre el derecho internacional y la gobernanza relevantes para la RDC y la Carnegie Climate Governance Initiative (C2G) ha explorado las cuestiones de gobernanza en una serie de sesiones informativas y materiales educativos (C2G, 2021) para aquellos que deseen profundizar en ello.

C. Forestación y reforestación

La plantación intencionada de nuevos árboles en lugares donde no han crecido tradicionalmente (forestación) o la replantación donde han sido cultivados, han muerto o han sido removidos por otros medios (reforestación) que da lugar a una absorción neta de CO₂ a medida que los árboles crecen, desempeña un papel importante en las actuales medidas de respuesta al cambio climático (Doelman et al., 2020). Sin embargo, una vez que un árbol o un bosque alcanza la madurez, la absorción de CO₂ se ralentiza (Houghton, 2013) y cuando el ciclo de vida de un árbol se completa se descompone, y el CO₂ se devuelve a la atmósfera (Read et al., 2009). Esta liberación de CO₂ puede evitarse mediante la gestión de los bosques, con la tala de árboles maduros y el almacenamiento de la biomasa en productos de madera de larga duración, como en el interior de los edificios, McLaren (2012), por ejemplo, ha sugerido que entre 0,5 y 1 GtCO₂ de biomasa al año podría secuestrarse en edificios para almacenamiento a largo plazo. La forestación gestionada por producto también puede utilizarse para bioenergía o biocarbón (RS & RAE, 2018). Tras la tala, la nueva plantación y el posterior rebrote del bosque o la revegetación natural permiten seguir con la remoción de CO₂.

La capacidad de remoción neta de la forestación es incierta y siguen existiendo múltiples cuestiones relativas a su eficacia, cuestiones de localización y efectos, incluidos los efectos sobre la biodiversidad y los suelos, los cambios en las cuencas hidrográficas y la gestión de los recursos hídricos. Es necesario comprender mejor el equilibrio de los efectos de la plantación de árboles entre su secuestro de carbono y sus efectos de calentamiento. Por ejemplo, la sombra de los árboles donde predominan las coníferas de hoja oscura puede tener un efecto de calentamiento neto (Lundquist et al., 2013). Por lo tanto, es necesario investigar más sobre los modelos climáticos para comprender mejor todos los efectos de los cambios en la cubierta forestal (Winckler et al., 2019).

Griscom et al. (2017) sugieren que la capacidad de remoción de la forestación oscila entre 3 y 18 GtCO₂ al año, y que la variación depende de las hipótesis sobre las tierras disponibles para la plantación, que van de 350 a 1780 millones de hectáreas (MHa). Las pruebas anteriores que informan de la estimación del IPCC indican una capacidad global de 1 a 7 GtCO₂ por año para 2050 (IPCC, 2018). En una evaluación más conservadora Smith et al. (2016) estiman un secuestro máximo a través de la forestación de 12 GtCO₂ por año para el año 2100.

Las estimaciones de los costos de forestación y reforestación se han evaluado entre 15 y 30 USD por tonelada de CO₂ (Smith et al., 2016), mientras que el IPCC sólo proporciona costos de reducción de entre 5 y 50 USD por tonelada, lo que demuestra la considerable incertidumbre sobre los posibles costos que también existe.

La plantación de bosques creará tensiones de compensación relacionadas con el cambio de uso de la tierra o con futuras oportunidades de uso de la misma, lo que incluye, por ejemplo, la producción de alimentos y otros enfoques para remover CO₂. Por lo tanto, las compensaciones políticas pueden convertirse en el futuro en una importante agenda de gobernanza de la forestación (Hammad et al., 2020). Es necesario comprender mejor, por ejemplo, cómo equilibrar las opciones de uso de la tierra, la producción de biomasa y biocombustible, los cultivos y el pastoreo con la forestación, protegiendo al mismo tiempo la cultura y los derechos de los pueblos indígenas de la forma más equitativa, económicamente viable y socialmente aceptable (Rouse, 2020).

No se puede adoptar un enfoque único para la forestación y puede ser importante considerar cuidadosamente las circunstancias locales, antes de tomar cualquier decisión sobre dónde forestar o no (RS & RAE, 2018). Es importante destacar que la plantación puede socavar la capacidad de los propietarios de generar ingresos a corto plazo, lo que significa que pueden buscar su seguridad a través de pagos para salvar el período entre la plantación y la cosecha.

Actualmente, a nivel mundial, se prevé que la forestación cumpla con el 25 % de todas las CDN comprometidas de mitigación hasta 2030 (UNFCCC, 2015). Además, el Desafío de Bonn (IUCN, 2011), un esfuerzo global para reforestar 350 MHa de bosque para 2030, ha sido respaldado y ampliado por la Declaración de Nueva York sobre los Bosques en la Cumbre del Clima de la ONU de 2014 (ONU, 2014). Hasta la fecha, la Declaración ha sido respaldada por 40 gobiernos nacionales, 56 empresas y más de 70 organizaciones de la sociedad civil y de los pueblos indígenas.

Es necesario mejorar la supervisión de las tasas de forestación y deforestación y acordar un sistema de registro global preciso (IPCC, 2018). Esto es un reto y requerirá recursos para que sea eficaz. Algunos ejemplos de los retos de la supervisión son el registro de la capacidad variable de absorción de las especies a lo largo del tiempo en múltiples entornos y con complejas diferencias de suelo y riego, y las complejidades de informar y verificar los flujos de gases en un sector que es, simultáneamente, un sumidero y una fuente de CO₂ y otros gases de efecto invernadero de origen natural y humano (Welch et al., 2019).

D. Afloramiento artificial del océano

En gran parte de los océanos de latitudes medias y bajas, los nutrientes están agotados en las aguas superficiales, lo que limita la producción biológica (Moore et al., 2013). El afloramiento artificial utilizaría intervenciones de ingeniería para llevar aguas más profundas y ricas en nutrientes hacia la superficie, estimulando el crecimiento del fitoplancton y la absorción de carbono. Las aguas afloradas serían más frías que las superficiales y, por tanto, enfriarían las aguas superficiales aumentando su capacidad de absorción de calor de la atmósfera a escala local (es decir, proporcionando "aire acondicionado" a las ciudades costeras cercanas) (GESAMP, 2019).

Hasta la fecha, no se dispone de una tecnología escalable, aunque se han realizado algunos experimentos de campo con dispositivos a muy pequeña escala durante varios meses en el lago Qiandao (China) y en una prueba marítima en el Mar de China Oriental (Pan et al., 2016). Otros estudios y experimentos de campo (Aure et al., 2007, Fan et al., 2020) sugieren que puede ser posible un dispositivo de afloramiento artificial robusto y eficiente, que utilice energía autoalimentada (Pan et al., 2016).

Se ha estimado que el máximo teórico de captura y almacenamiento de carbono de esta técnica sería inferior a 20 Gt para 2100 (GESAMP, 2019), mientras que el (IPCC, 2019) ha concluido que las intervenciones a gran escala a largo plazo podrían ser contraproducentes en algunas circunstancias. Hasta la fecha no se han realizado mediciones experimentales del secuestro de carbono mediante esta técnica y los retos de ingeniería que deben superarse para conseguir un secuestro de carbono significativo mediante esta técnica son considerables, incluyendo cuestiones sobre los métodos de transporte de agua y el diseño y la construcción de los tubos.

Se desconoce el alcance de las repercusiones medioambientales de la técnica, pero se sabe que el afloramiento artificial puede afectar a la productividad de la biomasa (GESAMP, 2019). Además, si se aumenta el afloramiento a gran escala, pueden producirse consecuencias climáticas no deseadas, como la alteración de los patrones meteorológicos regionales y un calentamiento a largo plazo en lugar de un enfriamiento (Kwiatkowski et al., 2015). Además, algunas simulaciones sugieren que, si se detuviera el afloramiento artificial, las temperaturas de la superficie y las concentraciones atmosféricas de CO₂ aumentarían rápidamente (Oschlies et al., 2010).

Se desconoce cómo podrían responder los ciudadanos a la técnica y no se ha resuelto cómo podría gobernarse. Es probable que entre en el ámbito de aplicación del Protocolo de Londres y la CNUDM si se encuentra fuera de las zonas económicas exclusivas (ZEE). Sin embargo, es poco probable que el Convenio y el Protocolo de Londres tengan relación con la técnica, ya que no incluye el vertido de materiales. Si afecta a la biodiversidad, puede ser aplicable el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB).

E. Producción y depósito de biocarbón

El biocarbón es una forma estable y duradera de carbono que constituye un método bien conocido y establecido. El biocarbón se forma, en la pirólisis, cuando la biomasa se calienta en un recipiente cerrado, con poco o ningún aire disponible, a más de 250°C. En combinación con la producción sostenible de biomasa, puede ser carbono negativo. Si se almacena en el suelo durante largos periodos de tiempo, se espera que el biocarbón no solo almacene carbono, sino que también mejore la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos (Lehmann & Joseph, 2015) así como la calidad del agua y los niveles de nutrientes (Smith, 2016).

Se sugiere que una tonelada de biocarbón puede remover entre 2,1 y 4,8 tCO₂ (Lehmann & Joseph, 2015; Hammond et al, 2011), aunque sigue existiendo incertidumbre, por ejemplo, el IPCC estima un potencial de remoción global de entre 0,3 y 35 GtCO₂ año⁻¹ en 2050 (IPCC, 2018) mientras que otros sugieren un potencial de remoción acumulado que oscila entre 78 y 477 GtCO₂ este siglo (The Institute For Carbon Removal Law and Policy, 2018). Los costos de la remoción del biocarbón también son inciertos con Woolf et al. (2010) estimando el costo entre 18 y 166 USD por tCO₂ producida y Fuss et al. (2018) estimando un costo por tonelada de entre 90 y 120 USD.

Existe una amplia gama de actividades de investigación en curso sobre el biocarbón que ayudan a comprender mejor lo que constituye un “buen” biocarbón en aplicaciones agronómicas y de gestión medioambiental. Las áreas de investigación actuales incluyen la exploración de las incertidumbres asociadas a las tasas de descomposición de los distintos tipos de biocarbón, en función de la materia prima de la pirólisis y de la temperatura (Anderson, 2020).

No se espera que la implantación y la ampliación del biocarbón susciten grandes preocupaciones sociales, aunque puede haber cierta reticencia y preocupación social por los efectos en los bosques o el suministro de alimentos (Smith et al., 2010). Puede ser importante para los que desarrollan la infraestructura la claridad con la comunidad local en general sobre la naturaleza de los métodos de combustión y sus subproductos.

La supervisión, la notificación y la verificación de la adopción y el uso del biocarbón pueden ser difíciles, tanto a nivel estatal como internacional (RS & RAE, 2018). Sin embargo, la mejora del sistema de registro será importante en el futuro y es posible que, a largo plazo, el biocarbón esté sujeto a mecanismos de gobernanza internacional como el CDB y la CMNUCC.

F. Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono

La BECCS implica la quema de biomasa para generar electricidad, calor o combustible líquido. El CO₂ emitido durante la combustión se captura y se almacena en depósitos subterráneos a largo plazo, eliminándolo efectivamente del ciclo del carbono (RS/RA, 2018). A pesar de su amplia inclusión en los modelos de evaluación integrados evaluados por el IPCC, la BECCS sigue siendo una tecnología incipiente y, aunque cada parte de la tecnología ha sido probada a escala de demostración y comercial, existen muy pocos proyectos a escala comercial a nivel mundial (Brack y King, 2020).

El éxito de la BECCS depende de un suministro seguro y regular de biomasa, que puede cultivarse para este fin o derivarse de residuos, obtenida localmente para minimizar las emisiones del transporte.

Si se cultiva, es importante que el cultivo sea de crecimiento rápido, que se sustituya rápidamente y que el cultivo de BECCS no perjudique a los cultivos para asegurar el suministro de alimentos u otros fines (RS & RAE, 2018).

El IPCC ha identificado estimaciones para los potenciales de mitigación total de BECCS para el año 2050 en el rango de 1 a 85 GtCO₂ (IPCC, 2018) mientras que Fuss et al. (2018) sugieren que BECCS puede tener el potencial de remover entre 0,5 y 2 GtCO₂ por año para 2050. Bhave et al. (2017) sugieren que los costos pueden oscilar entre 140 y 270 USD por tonelada de CO₂ capturada, mientras que el IPCC señala que la mayoría de las estimaciones de costos están por debajo de los 200 USD (IPCC, 2018).

BECCS a escala de efectos climáticos requerirá un cambio en el uso de la tierra (Daggash et al., 2019) creando una competencia con el suministro de alimentos, lo que podría conducir a aumentos en los precios de los alimentos o efectos en la seguridad alimentaria (Hasegawa et al., 2018). Además, se necesitará agua dulce y nutrientes para que los cultivos de biomasa prosperen, lo que podría crear más tensiones, incluso en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Las cuestiones relacionadas con el cambio de uso del suelo pueden crear tensiones y la política tendrá que encontrar la manera de equilibrar las demandas de tierra para apoyar la BECCS con las necesidades de asentamientos, energía, remoción de carbono y alimentos. Dado que varios países ya tienen compromisos políticos nacionales y estrategias de implantación de bioenergía y BECCS (RS & RAE, 2018), estos junto con las implicaciones medioambientales necesitan una resolución urgente.

En general, se considera que la gobernanza de la BECCS comprende dos elementos, la producción y el uso de la biomasa y los elementos de la CAC (Torvanger, 2019). Esto último se refiere sobre todo a la supervisión, notificación y validación (MRV) de la captura y el almacenamiento, así como a la seguridad y permanencia del almacenamiento a largo plazo. La agenda de la biomasa implica tener en cuenta la sostenibilidad y el uso de los recursos relacionados con la producción, el procesamiento y el uso de la energía de la biomasa, y las interacciones con el ciclo global del carbono. Las compensaciones entre la producción de biomasa con la BECCS y el uso competitivo de la tierra y el agua también requerirán la atención de la gobernanza, normalmente a nivel local (Torvanger, 2019).

G. Secuestro de carbono en suelos

El carbono puede capturarse y secuestrarse en el suelo, dependiendo del tipo de suelo, el uso y la disponibilidad de recursos y no hay barreras técnicas significativas para el secuestro de carbono en el suelo, las prácticas se entienden y en algunos casos ya se practican en la agricultura (RS & RAE, 2018) y ya están en juego medidas que pretenden promover el método como colaborador en pro de los objetivos de cambio climático del Acuerdo de París, incluida la "iniciativa 4 por 1000" (Soussana et al., 2019).

La técnica se puede entender de varias formas (The Institute For Carbon Removal Law and Policy, 2018; RS & RAE, 2018):

- variedades de cultivo mejoradas y cambios en su rotación y cultivo;
- el uso de nuevas biotecnologías;
- gestión de nutrientes y optimización del uso de los fertilizantes a través de un calendario cuidadoso y aplicaciones precisas;
- minimización del laboreo y maximización del secuestro de la materia orgánica;
- mejora de los pastos, especialmente mediante el fomento y la plantación de los que tienen raíces profundas, y la densidad del césped; y
- mejora de la gestión del pastoreo, prestando atención al suministro/producción de alimentos y a la densidad de población.

La evaluación de la capacidad mundial de secuestro de carbono de este modo es compleja, por lo que las estimaciones derivadas de los modelos son variadas y oscilan entre 1 y 11 GtCO₂ al año (Lal, 2011; Lal, 2013; Minasny et al., 2017). Si queremos cuantificar con precisión el volumen de carbono secuestrado y cualquier liberación de gases de efecto invernadero distintos del carbono (Lal, 2011) mediante este enfoque, se necesitan métodos rápidos y fiables para la medición del carbono del suelo y los flujos de gases (RS & RAE, 2018).

Smith (2016) sugiere que la adopción de las prácticas requeridas tiene el potencial de crear un beneficio de hasta 3 USD por tonelada de CO₂ gracias a la mejora de la productividad. En otras circunstancias, dependiendo de las condiciones del suelo y del entorno, Smith sugiere que la implantación puede costar hasta 12 USD por tonelada.

Sin embargo, y lo que es más importante, a largo plazo la capacidad de almacenar carbono adicional año tras año disminuirá a medida que los suelos se saturen y solo se puede esperar que el secuestro continúe durante aproximadamente 20 años, después de lo cual se hace imposible secuestrar carbono adicional a través de estos tipos de intervenciones (Zomer et al., 2017).

Hay una falta de conocimiento sobre los beneficios del enfoque entre algunos sectores de la comunidad agrícola/de gestión de la tierra, que tendrá que superarse con la educación y la formación, si la implantación se ampliara (Minasny et al., 2017).

H. Secuestro en océanos de carbono de residuos de cultivos

Los residuos de las cosechas u otro tipo de biomasa se cultivarían, se recogerían de forma centralizada y se llevarían a los puertos adecuados para su transporte y vertido en las profundidades del océano o en los deltas de los grandes ríos. Con lastre adicional adecuado, el biocarbón, la madera y otras materias orgánicas también podrían depositarse en el lecho marino profundo (GESAMP, 2019).

Teniendo en cuenta una distancia media de transporte terrestre de 200 km, y una distancia media combinada de transporte fluvial y marítimo de 4000 km, Strand y Benford (2009) sugirieron que el 30 % de los residuos agrícolas anuales globales de 2 Gt podrían generarse de forma sostenible sin dañar los suelos. No obstante, Keith (2001) sugirió que el uso de esa biomasa para producir electricidad en una central eléctrica que capturaré el CO₂ y lo secuestrará en formaciones geológicas sería una opción más eficaz. Lenton & Vaughan (2009) sugieren que una tasa de secuestro anual de hasta 1 Gt C de material por año, la mitad de los residuos agrícolas anuales mundiales, solo contribuiría de forma muy modesta a frenar el cambio climático.

El impacto medioambiental de depositar los residuos de los cultivos en las profundidades del océano es incierto. Sin embargo, se sabe que, si se implanta en aguas poco profundas (por debajo de los 1000 metros), sus impactos en los servicios del ecosistema podrían ser más significativos, especialmente en los caladeros de aguas profundas. Además, se produciría un agotamiento del oxígeno a largo plazo y un posible aumento del sulfuro de hidrógeno, el metano, el óxido nitroso y los nutrientes (compuestos de nitrógeno y fósforo) derivados de la degradación de la materia orgánica, que podrían ser importantes a nivel regional (GESAMP, 2019).

Esta posible técnica no es actualmente objeto de una investigación significativa, y no se sabe cómo respondería el público a esta técnica. Para llevar suficiente masa de material a las profundidades de los océanos para que tenga un efecto palpable, sería necesario construir una nueva infraestructura y un mecanismo de mercado a gran escala (GESAMP, 2019). La cantidad de material que se extraiga, y el lugar de donde se extraiga, requerirá un control y una regulación para proteger los suelos y las producciones de los cultivos, así como para informar al mecanismo de mercado (GESAMP, 2019). Además, los residuos de los cultivos proporcionan múltiples servicios dentro de los sistemas agrícolas. Esta técnica podría tener entonces consecuencias importantes, involuntarias y perjudiciales para esos sistemas; no obstante, esto no ha sido objeto de una investigación sistemática hasta la fecha.

La técnica puede ser admisible en el marco de la categoría de material orgánico de origen natural del Anexo 1 del Protocolo de Londres y de la categoría de material orgánico no contaminado de origen natural del Anexo I del Convenio de Londres (International Maritime Organization, 2016) siempre que se realicen evaluaciones satisfactorias de los posibles impactos (GESAMP, 2019).

I. Captura directa de dióxido de carbono del aire y almacenamiento

La captura directa de dióxido de carbono del aire y almacenamiento (DACCS, por sus siglas en inglés), incluye una familia de tecnologías que utilizan la ingeniería química para remover el CO₂ del aire que nos rodea. El carbono se secuestra de forma que no contribuya al calentamiento global. Entre los posibles métodos de secuestro referenciados en la literatura (GESAMP, 2019; IPCC, 2005) se incluyen:

- Inyección de CO₂ líquido en los océanos;
- Inyección en el fondo marino, en las depresiones del fondo marino, en los sedimentos o en las zanjas;
- Mineralización del CO₂ inyectado dentro de las estructuras geológicas.

Dado que la concentración de CO₂ en todo el mundo está en equilibrio (Goeppert et al., 2012), la ubicación de las unidades DACCS no tendría que estar vinculada a lugares específicos como las infraestructuras industriales emisoras de GEI. Por lo tanto, las plantas de DACCS podrían situarse cerca de fuentes de energía renovables o de bajas emisiones para alimentar el proceso, sobre formaciones geológicas adecuadas para el almacenamiento de CO₂ y en zonas que no sean sensibles desde el punto de vista medioambiental ni estén densamente pobladas (RS & RAE, 2018).

Para extraer CO₂, dos enfoques de DACCS reciben la mayor atención en la literatura. La adsorción, en la que una sustancia química recoge en su superficie moléculas procedentes de otra sustancia, o la absorción, en la que el CO₂ se introduce en el volumen de otro material, es decir, se absorbe. Otros enfoques emergentes son el método por oscilación, el método por oscilación de la humedad, el bucle de carbonato y la separación por membrana (Voskian & Hatton, 2019; Fasihi et al., 2019; Samari et al., 2020; Fujikawa et al., 2021).

En la actualidad, las tecnologías de DACCS se sitúan entre la fase de planta piloto y la de demostración a pequeña escala o prototipo sobre el terreno. Supuestos conservadores, como Viebahn et al. (2019), sugieren que es poco probable que DACCS esté disponible a gran escala antes de 2030. Hanna et al., (2021) han sugerido que la inversión del 1,2 al 1,9 % del Producto Interior Bruto (PIB) mundial en DACCS solo permitiría remover del orden de 2 GtCO₂ al año.

Antes de que las tecnologías puedan ampliarse, es necesario resolver algunas cuestiones pendientes, como los requisitos energéticos, la longevidad del almacenamiento de CO₂ y las necesidades de recursos naturales (RS & RAE, 2018). Se sugiere que, a largo plazo, la DACCS tiene un potencial de secuestro global de entre 0,5 y 5 gigatoneladas de CO₂ al año para 2050 (Fuss et al., 2018).

Tanto los enfoques de adsorción como los de absorción tienen altos requisitos de calor o energía para proporcionar un suministro de aire a través de la planta y para reactivar los agentes y liberar el CO₂. Daggash et al. (2019) sugieren que DACCS basado en la absorción requeriría un aporte de energía de 1500-2500 kWh para el calor y otros 220-500 kWh de electricidad por tonelada de CO₂ removida. Las necesidades energéticas del adsorbente se sitúan en el rango de 200-1000 kWh de electricidad y 640-1700 kWh de calor por tonelada de CO₂ (CLIMEWORKS, 2019). Una vez extraído el CO₂, sea cual sea la forma elegida, el secuestro demanda recursos energéticos adicionales, como por ejemplo para el transporte y el bombeo a los embalses.

Para maximizar el potencial de DACCS para la remoción neta de carbono, la energía necesaria se obtendría mejor de fuentes de bajo carbono y bajo impacto, como la energía solar, eólica y nuclear, o

mediante la ubicación conjunta de las plantas con los procesos industriales que emiten calor residual, como las centrales de gas. Sin embargo, para que la DACCS a gran escala se apoye en las fuentes de energía renovable, se requiere una mayor eficiencia y un cambio radical en la capacidad global de las energías renovables. Además de las necesidades de energía y calor, hay otros costos que hay que tener en cuenta, por ejemplo:

- recursos hídricos: entre 1 y 30 M³ de agua por tonelada de CO₂ (CLIMEWORKS, 2019, Smith, 2016);
- recursos naturales: aunque la DACCS no requiere biomasa y no dañaría los ecosistemas, es necesario realizar una evaluación del ciclo de vida de las tecnologías de DACCS (RS & RAE, 2018);
- costos de sustitución del sorbente y de otros trabajos de mantenimiento (Fuss et al., 2018);
- costos de secuestro de CO₂, incluidos la preparación para el depósito, el transporte y, dependiendo de la ubicación y el tipo de almacenamiento, los costos de almacenamiento; y,
- la inversión de capital y los costos de oportunidad.

Las estimaciones de los costos financieros de la ampliación de DACCS son muy variadas. Por ejemplo, Sanz-Pérez et al., estiman los costos entre 30 y 1000 USD por tonelada de CO₂ capturada (Sanz-Pérez et al., 2016) mientras que Fuss et al. (2018) estiman un costo de entre 100 y 300 USD por tonelada. Los proyectos piloto a pequeña escala funcionan actualmente a menos de 600 USD por tonelada (CLIMEWORKS, 2019).

Una lectura de las evaluaciones de las necesidades de investigación (Sandalow et al., 2018; Gambhir & Tavoni, 2019; National Academies of Sciences, 2019) sugiere que las siguientes son áreas clave para la investigación de DACCS en el futuro, sin orden de prioridad:

- lograr una mayor eficiencia energética, térmica y del agua;
- desarrollar una mejor comprensión de los impactos de sostenibilidad de DACCS;
- resolver las incertidumbres restantes del ciclo del carbono;
- mejorar la producción de combustibles renovables sintéticos utilizando el carbono capturado;
- comprender mejor cómo ofrecer una remoción y un almacenamiento de carbono permanentes y neutros desde el punto de vista medioambiental;
- la economía y la política de un mercado de carbono compatible con DACCS;
- la aceptabilidad social de DACCS;
- la comprensión de las interacciones entre la DACCS y la política de mitigación;
- y el registro y la gobernanza mundial del carbono.

Es probable que las plantas de DACCS tengan una huella pequeña, en comparación con las instalaciones industriales de tamaño medio, y no crearán ninguna amenaza en cuanto a la disponibilidad de la tierra, incluidos los servicios de los ecosistemas o la seguridad alimentaria (RS & RAE, 2018). Además, como las plantas de DACCS no tienen limitaciones geográficas, aparte de tener acceso a los suministros de energía y agua, las instalaciones no tienen por qué estar en zonas sensibles ni cerca de las poblaciones. Por lo tanto, no se espera que la ubicación de las plantas de DACCS dé lugar a problemas de aceptabilidad social significativos, aparte de los que surgen de las propuestas para cualquier instalación industrial de tamaño medio (RS & RAE, 2018).

J. Mejora de la alcalinidad del océano

Dado que el CO₂ absorbido en los océanos es ácido, la adición de alcalinidad adicional a la superficie del océano dará lugar a una mayor captación de CO₂ de la atmósfera. El aumento de la alcalinidad también ayudaría a reducir los efectos de la acidificación del océano en el ecosistema marino (GESAMP, 2019).

No se han realizado pruebas de campo, sin embargo, la mejora de la alcalinidad no requeriría ninguna tecnología novedosa o nueva: las materias primas necesarias ya están disponibles en la industria del cemento y en otras industrias o en minerales naturales, o se podría utilizar la mejora electroquímica de la meteorización de minerales de carbonato y silicato utilizando barcos para su distribución (RS & RAE, 2018). Sin embargo, la huella de carbono y de energía en los procesos actuales de fabricación de algunos de los materiales es muy grande (RS & RAE, 2018). Estas técnicas también pueden llevarse a cabo en tierra (véase la sección "Mejora de la meteorización terrestre", más adelante), lo que evita los costos de transporte a los océanos y por ellos.

Se desconocen los impactos de la introducción de partículas de estos materiales en el medio ambiente oceánico, por lo que sería necesario un examen más profundo antes de su aplicación (GESAMP, 2019).

El IPCC no estima una capacidad de remoción teórica para encadenar químicamente la alcalinidad (IPCC, 2018) aunque los estudios teóricos han sugerido que la mejora de la alcalinidad del océano podría remover hasta 3500 GtCO₂ para 2100 (González & Ilyina, 2016). Las estimaciones de costos oscilan entre 50 y 400 USD por tonelada (GESAMP, 2019).

En la actualidad, se está llevando a cabo una investigación muy limitada sobre esta técnica (Bach et al., 2019) y se requiere más investigación para desarrollar la comprensión sobre qué minerales u otros materiales proporcionarían el mejor rendimiento neto de CO₂. Los impactos probables en los ecosistemas oceánicos, la longevidad de cualquier secuestro, la economía y la eficiencia de los recursos de los métodos y cómo se supervisaría tanto la implantación como sus efectos (GESAMP, 2019). Pidgeon et al. (2013) indican que el público puede no apoyar intervenciones de esta naturaleza basadas en el océano, lo que sugiere que la investigación sobre la aceptabilidad de la técnica también puede estar justificada.

La técnica podría estar incluida en el Anexo 4 del Convenio de Londres y el Protocolo de Londres y la CNUDM (A.-M. Hubert, 2020). Otras partes interesadas pueden ser organizaciones intergubernamentales o de la sociedad civil e intereses comerciales relacionados con la ingeniería química.

K. Meteorización terrestre reforzada

La meteorización de las rocas de carbonato y silicato, en la que las rocas reaccionan con el CO₂ para formar carbonatos, la remoción del carbono de la atmósfera es la principal forma de remover el CO₂ de la atmósfera en escalas de tiempo geológicas. (RS & RAE, 2018). La meteorización reforzada trataría de reproducir y acelerar artificialmente este proceso mediante el esparcimiento de minerales en la superficie o añadiéndolos al suelo utilizado para la agricultura. Se espera que la tecnología actual de minería, molienda y maquinaria agrícola sea capaz de extraer, preparar y distribuir el mineral. No obstante, se necesitaría una gran mejora de la maquinaria y la infraestructura disponibles a nivel mundial (Florin et al., 2020).

La comprensión subyacente de la química de la meteorización reforzada de los minerales de carbonato o silicato para reducir el CO₂ se entiende muy bien (National Academies of Sciences, 2019), lo que significa que las principales barreras para la implantación son cuestiones sobre cómo ampliar la capacidad, el costo, las posibles consecuencias ambientales o de otro tipo, junto con varias cuestiones de gobernanza en lugar de cuestiones técnicas sobre el método. Hay que tener en cuenta que, si se pudiera procesar, distribuir e implantar un volumen suficiente de minerales a una escala lo suficientemente grande, la capacidad de la meteorización reforzada para contribuir a la mitigación del CO₂ es prácticamente ilimitada (IPCC, 2013). Smith et al. (2016) han calculado que, si se trataran dos tercios de todas las tierras de cultivo con entre 10 y 30 toneladas de material por hectárea y año, se podrían remover entre 0,4 y 4 Gt por meteorización reforzada para el año 2100.

El IPCC sugiere un rango para el potencial de eliminación de carbono de 0,72 a 95 GtCO₂ por año (IPCC, 2018) aunque señala que se necesitan más pruebas antes de acordar las estimaciones. Un reciente experimento de envejecimiento mejorado ha sugerido que la técnica puede ser hasta tres veces menos eficiente de lo que se había sugerido anteriormente (Amann et al., 2020).

Un problema importante asociado a la meteorización reforzada es la necesidad de extraer, triturar, transportar y esparcir cantidades muy grandes de material. (RS & RAE, 2018) han estimado que con un proceso 100 % eficiente, se necesitarían al menos 7 km³ al año de material, el doble del volumen de todo el carbón extraído en 2018, para eliminar tanto CO₂ como el que emitimos actualmente.

Las estimaciones de costos oscilan entre 15 y 3460 USD por tonelada (McQueen et al., 2020; Beerling et al., 2020; IPCC, 2018; Renforth et al., 2011). También se sugiere que la meteorización reforzada en la superficie puede tener beneficios en el crecimiento de los cultivos a través de cambios en la disponibilidad de nutrientes (de Oliveira Garcia et al., 2020).

La técnica puede tener efectos negativos, desde, por ejemplo, la contaminación por partículas finas y la acumulación y liberación de níquel y cromo en los sistemas acuáticos y marinos (Edwards et al., 2017) lo que significa que se requiere una investigación adicional sobre el impacto medioambiental, además de la reciente prueba de concepto y los ensayos de campo a pequeña escala (McQueen et al., 2020; Kelemen et al., 2020; GGREW, 2020)

A pesar de los bajos niveles de comprensión sobre el enfoque (N. F. Pidgeon & Spence, 2017; Wright et al., 2014) y mientras se observa que lo que se ha hecho se ha centrado en Europa y los Estados Unidos, la investigación ha sugerido que la meteorización reforzada puede considerarse como una respuesta demasiado lenta, aunque la investigación en condiciones bien controladas es probable que sea aceptable (Cox et al., 2020). Cox et al. (2020) también sugieren que el público requiere una mayor claridad sobre los procesos que estarían implicados y desearían ver pruebas de que las actuales incertidumbres científicas pueden resolverse. Además, el estudio también indica que puede haber una preferencia por el uso de subproductos de las minas para mejorar la meteorización en lugar de perforar nuevas minas para acceder a los materiales.

Dado que la meteorización reforzada en tierra se llevaría a cabo dentro de las fronteras de los países, se aplicaría la legislación nacional y otras normas de gobernanza nacionales. Sin embargo, si se implantara la meteorización reforzada a una escala significativa, se requerirían nuevos mecanismos internacionales de seguimiento, verificación y presentación de informes, incluidos los mecanismos que tienen en cuenta los efectos transfronterizos del enfoque.

L. Cultivo de macroalgas para secuestro

El cultivo a gran escala en el mar de macroalgas o algas marinas para capturar el carbono a través de la fotosíntesis con la posterior cosecha para el secuestro o la producción de biocombustible con la captura de carbono podría, en teoría, dar lugar a la remoción neta de CO₂ (N'Yeurt et al., 2012), y desempeñar un papel en la mejora de la bomba biológica, el proceso natural impulsado biológicamente del océano para absorber y hacer circular el dióxido de carbono a las profundidades del océano (Sigman & Haug, 2003).

La acuicultura de macroalgas cercanas a la costa para la alimentación es una industria bien establecida en todo el mundo (Pereira et al., 2013) y puede suponer ya la acumulación de ~0,8 Mt de carbono orgánico al año en la región de Asia-Pacífico (Sondak et al., 2017). Si se amplía, se calcula que, si el 9 % de los océanos se convirtiera en acuicultura de macroalgas, se podrían generar 12 Gt al año de metano biodegradable. (N'Yeurt et al., 2012). Se podría quemar posteriormente como sustituto del gas natural. La biomasa implicada capturaría 19 GtCO₂ y el CO₂ producido por la combustión del metano sería capturado y secuestrado.

Se está investigando el efecto de la acidificación de los océanos con el crecimiento de las macroalgas (Rodríguez et al., 2018), que puede disminuir el valor de la técnica si la acidificación continúa, y la conversión de las algas en bioproductos que utilicen el carbono capturado de forma que lo secuestren a largo plazo (BMRS, 2019).

Como método de cultivo existente, se ha sugerido que su proliferación en la región de Asia-Pacífico no plantearía nuevos retos socioeconómicos (Pereira et al., 2013). Pereira también sugiere que es probable que la diversificación a otras regiones resulte práctica, aunque la ampliación requeriría una importante inversión en infraestructuras y un compromiso político (RS & RAE, 2018). Además de los beneficios medioambientales, la técnica puede tener valor económico por su venta para la nutrición, la energía y los fertilizantes, aunque algunos de estos usos pueden significar que el método no capture los GEI a largo plazo y, como tal, pueda no calificarse como RDC (RS & RAE, 2018). Cabe destacar que esta técnica evitaría la competencia por los recursos terrestres de otros métodos de forestación y, dependiendo de la ubicación, es posible que no compita con los recursos marinos pudiendo, potencialmente, mejorarlos (GESAMP, 2019).

La FAO puede desempeñar un papel en algunos aspectos del seguimiento de la producción de macroalgas aprovechando sus evaluaciones periódicas de la acuicultura, que incluyen detalles sobre la producción mundial de diversos tipos de plantas acuáticas (FAO, 2014). En el caso de las aguas situadas fuera de la ZEE, la técnica entraría en el ámbito del derecho internacional consuetudinario, el Protocolo de Londres y la CNUDM.

M. Captura y almacenamiento de carbono en el océano

La captura y almacenamiento de carbono en el océano (OCCS por sus siglas en inglés) removería el carbono inorgánico disuelto de los océanos para llevarlo a lugares de almacenamiento a largo plazo, aumentando la capacidad de los océanos para absorber el CO₂ de la atmósfera impulsado por un retorno natural al equilibrio. Los principios en los que se basa la técnica son bien conocidos y se utilizan a pequeña escala en los laboratorios durante el análisis del agua de mar (WILLAUER & HARDY, 2017). Sin embargo, aún quedan muchas cuestiones críticas de investigación, sobre todo la viabilidad del desarrollo de ingeniería a gran escala de la OCCS y los costos asociados, y si un sistema a escala sería adecuado para la mitigación del clima (GESAMP, 2019).

No está claro qué incentivos serían necesarios para fomentar la adopción de una tecnología probada. ¿Qué instituciones la desarrollarían y por qué no se conoce? Tampoco se sabe dónde se almacenaría el carbono capturado y a qué costo de oportunidad, ni si la técnica sería socialmente aceptable. Sin embargo, se están creando algunos modelos técnicos y económicos limitados (Eisaman et al., 2018) que exploran los desafíos de costo e infraestructura de la OCCS.

Si se realiza en aguas costeras, la OCCS estaría sujeta a la regulación de los estados nacionales, al derecho consuetudinario y a un diálogo de gobernanza más amplio. En aguas internacionales, los marcos de gobernanza son inciertos.

N. Fertilización de los océanos con hierro (FOH)

La fotosíntesis del plancton en el océano remueve alrededor de 40 Gt de CO₂ al año de la superficie del océano y lo transporta hacia las profundidades. (RS & RAE, 2018). La fertilización oceánica con hierro pretende potenciar este proceso introduciendo micronutrientes adicionales para impulsar un mayor crecimiento del plancton. La distribución de hierro en los océanos es técnicamente factible y la infraestructura industrial necesaria es bien conocida (GESAMP, 2019).

Las estimaciones sobre la capacidad de la fertilización con hierro de los océanos para eliminar y almacenar CO₂ son extremadamente inciertas. Por ejemplo, IPCC estima un rango de 15,2 kt para pequeñas intervenciones hasta 44 Gt, (IPCC, 2018) mientras que la Royal Society y la Royal Academy of Engineering, ofrecen una estimación de 3,7 GtCO₂ por año (RS & RAE, 2018). Las estimaciones de costos de esta técnica también varían y suponen una importante incertidumbre. El IPCC, por ejemplo, estima un costo de entre 2 y 457 USD por tonelada de CO₂ removido (IPCC, 2018).

Durante las pruebas han surgido algunos posibles efectos secundarios, como el aumento de la población de especies tóxicas de algas unicelulares diatomeas (Silver et al., 2010; Trick et al., 2010)). Si la fertilización con hierro se lleva a cabo en grandes áreas, puede haber reducciones, así como aumentos en la productividad, afectando a la pesca y potencialmente al robo de nutrientes de las regiones inferiores, con posibles implicaciones geopolíticas y económicas (GESAMP, 2019).

La técnica se incluye en el Anexo 4 del Protocolo de Londres (OMI, 2013). Otras partes interesadas podrían ser la sociedad civil y los intereses comerciales; sin embargo, el Protocolo de Londres ha mostrado autoridad para la regulación de la fertilización de los océanos, lo que es ampliamente visto como una moratoria de facto sobre las actividades comerciales de fertilización de los océanos (IPCC, 2018).

O. Fertilización de los océanos con macronutrientes, nitrógeno y fósforo (FOM)

El principio subyacente de la fertilización de los océanos con macronutrientes, nitrógeno y fósforo (FOM) es el mismo que el de la fertilización con hierro (visto anteriormente), simplemente utiliza nitrógeno y/o fósforo en lugar de hierro. Se ha sugerido que la fertilización con nitrógeno, con los costos adicionales que incluyen la fabricación, el transporte y la distribución por buques en el océano, es potencialmente un medio más eficiente de secuestro que la fertilización con hierro (Harrison, 2017; Mearns, 2004). Harrison, (2017) sugiere que la técnica tiene una capacidad teórica de compensar hasta el 15 % de las emisiones de CO₂ globales anuales (en 2017).

Todavía es necesario investigar para comprender la viabilidad de este enfoque y la infraestructura de la cadena de suministro y los mecanismos de mercado que serían necesarios para respaldar la implantación. Debido a que las existencias de fósforo están disminuyendo, existe la preocupación en relación con la capacidad futura de fertilizar los cultivos, la oferta limitada y la volatilidad de los precios también pueden ser factores importantes para la geopolítica del uso del fósforo con esta técnica (GESAMP, 2019).

La técnica entraría en el ámbito de aplicación del Anexo 4 del Protocolo de Londres, que restringe el vertido (A.-M. Hubert, 2020). Las organizaciones intergubernamentales y de la sociedad civil, así como los intereses comerciales, especialmente los relacionados con la producción de alimentos y la minería/minerales, pueden tener un interés especial en la gobernanza de la técnica.

P. Recuperación de turberas, humedales y hábitats costeros

La restauración de las turberas, los humedales y los hábitats costeros apenas requiere nuevas tecnologías (Zedler & Kercher, 2005). Se centra en la rehumectación o el restablecimiento de entornos, normalmente a través de prácticas para bloquear el drenaje excesivo, incluidas la construcción de presas, la gestión de la vegetación y la repoblación con plantas, para colonizar y, por tanto, mejorar la capacidad de carbono (SNH, 2019). Junto con esto, se requieren medidas para proteger los ecosistemas contra una mayor explotación y degradación (CG et al., 2011).

Las estimaciones actuales del máximo secuestro de carbono a largo plazo que puede lograrse mediante la mejora de los humedales, indican un potencial de entre 0,4 y 18 toneladas de CO₂ por hectárea y año, lo que supone un potencial global de aproximadamente 1 GtCO₂ por año para 2030 (CG et al., 2011). La restauración de los ecosistemas costeros podría eliminar teóricamente 0,2 GtCO₂ al año (Griscom et al., 2017). Sin embargo, esto puede ser un reto, debido a la naturaleza semipermanente y continua de la mayoría de los cambios en el uso del suelo costero (Li et al., 2018). Se ha calculado que los costos de secuestro de carbono en los humedales de agua dulce oscilan entre 10 y 100 USD por tonelada de CO₂ (Kayranli et al., 2010) y las estimaciones para la restauración de entornos de agua salada oscilan entre 2508 y 383672 USD por hectárea (Bayraktarov et al., 2016).

La restauración de los humedales puede tener una serie de beneficios no relacionados con el clima, como la mejora de la resistencia a las inundaciones y a los efectos de las tormentas, la mejora de la calidad del agua, la biodiversidad y el empleo y los beneficios recreativos, algunos de los cuales pueden contribuir a los objetivos globales de sostenibilidad (Zedler & Kercher, 2005).

La liberación de metano y óxido nitroso de los humedales puede suponer entre el 20 % y el 25 % de las emisiones mundiales (Whiting & Chanton, 2001). Aunque las revisiones de las tecnologías de mitigación del metano indican que esto puede ser una tarea difícil (Stolaroff et al., 2012; Lockley, 2012), se sabe que dichas emisiones pueden reducirse significativamente mediante la plantación de musgos y otra cobertura vegetal en los humedales no costeros. La técnica puede entonces ser capaz tanto de eliminar el CO₂ como de reducir las emisiones de GEI.

A pesar de la útil revisión del potencial de mitigación de los humedales costeros preparada por (IPCC, 2019), si se quiere comprender plenamente la restauración de los humedales y aprovechar al máximo cualquier potencial de RDC, puede resultar beneficioso realizar más investigaciones para entender mejor el potencial de la técnica.

Los principales obstáculos para la restauración de humedales a gran escala son, en gran medida, financieros. Con frecuencia, el valor económico directo de los beneficios colaterales que acompañan a la recuperación, como la mejora de la calidad y disponibilidad del agua y el aumento de la biodiversidad, puede ser insuficiente para compensar el valor de la pérdida de tierras (RS & RAE, 2018). Por lo tanto, es posible que se requieran mecanismos de incentivos financieros y que se mantengan a largo plazo.

También siguen existiendo retos relacionados con la supervisión, la verificación y la notificación del secuestro de carbono conseguido, el seguimiento rentable de los flujos y los efectos, positivos o negativos, del cambio de uso de la tierra (RS & RAE, 2018).

V. Gobernanza de las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono para su consideración global

Existen varios aspectos genéricos de gobernanza que podrían afectar el despliegue o implementación de las medidas y tecnologías de RDC analizadas en el capítulo anterior. En este capítulo se ofrece un resumen de estos aspectos.

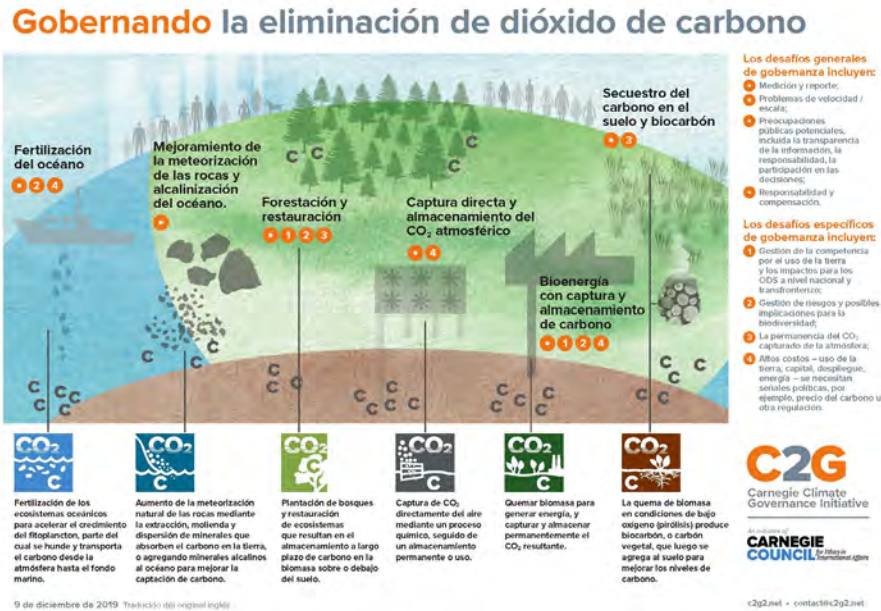
A. Gobernanza de la investigación

La investigación sobre las medidas y tecnologías de RDC puede ayudar a reducir la incertidumbre, solventando algunos de los retos de gobernanza descritos (Mace et al., 2021). Abordar esta necesidad de investigación es un reto de gobernanza en sí mismo. No está claro, por ejemplo, cómo se identificarán las lagunas de conocimiento, cómo se establecerá la agenda de investigación y cómo se asegurará la financiación y se proporcionará a los investigadores adecuados.

Se ha sugerido que las evaluaciones integradas de alta calidad de la RDC serán una herramienta clave para abordar algunas de las incertidumbres de la RDC (Fuss et al., 2018). Sin embargo, estos son escasos y aunque en 2017 se publicaron más de 200 artículos de revisión de RDC (Minx et al., 2017) y varios autores han tratado de evaluar una serie de técnicas (por ejemplo, RS & RAE, 2018; Fuss et al., 2018; National Research Council, 2015; McLaren 2012), estas evaluaciones se han fragmentado con la selección de un conjunto diferente de técnicas, evaluándolas y comparándolas con diferentes métricas.

La investigación de RDC puede causar daños. Por ejemplo, las pruebas de campo pueden dañar la biodiversidad local y la infraestructura de DACCS utilizada para demostración puede repercutir en la disponibilidad de recursos hídricos (para una revisión de los posibles daños de la RDC, véase (Dooley et al., 2021)). Por ello, no solo el proceso de investigación y política científica requiere y tiene implicaciones para la gobernanza, sino que también habrá que tener en cuenta la gobernanza a nivel de proyecto. Como reflejo de esto, se han desarrollado varios códigos de conducta no vinculantes, como los Principios de Oxford (Rayner et al., 2013), los Principios de Asilomar para la Investigación de Técnicas de Ingeniería Climática (Asilomar Scientific Organizing Committee, 2010), el Grupo de Trabajo Académico sobre Gobernanza de la Ingeniería Climática (AWG, 2018) y el Código de Conducta para la Investigación Responsable de la Geoingeniería (A. Hubert, 2020).

Imagen 1
 Gobernanza de las medidas y tecnologías de RDC, un resumen de la agenda clave de gobernanza y las técnicas de RDC



Fuente: C2G2 (2018).

B. Monitoreo, reporte y verificación

Se sugiere que el monitoreo, reporte y verificación (MRV, por sus siglas en inglés) de las técnicas de remoción requerirá un sistema de registro global (Honegger, 2020) y que, dada la gama de enfoques de RDC y la variación con la que eliminan y almacenan el carbono, y los desafíos asociados con la permanencia y las fugas, cualquier iniciativa de MRV futura tendrá que funcionar en el contexto de una incertidumbre considerable (Honegger, 2020). Por lo tanto, no está claro cómo la comunidad internacional puede resolver los desafíos ambientales, políticos y de investigación que quedan para MRV, y si se puede hacer, y cómo, en el contexto de los marcos existentes (Florin et al., 2020).

C. “Riesgo moral” o “disuasión de mitigación”

McLaren et al. (2016), Wagner (2020) y otros han debatido la cuestión del riesgo moral, es decir, la idea de que el uso de la RDC y su posible efecto de enfriamiento podría servir de excusa a las partes interesadas para no intensificar los esfuerzos de reducción de emisiones o para seguir utilizando los combustibles fósiles al ritmo actual, o incluso a un ritmo mayor. Se sugiere que esto también podría ocurrir debido a la creación de modelos teóricos, si la promesa de cualquier técnica de RDC identificada en los estudios disuade de reducir las emisiones a corto plazo, reduciendo el costo social futuro percibido del carbono (McLaren et al., 2016).

En el contexto de los escenarios de emisiones modelados que cumplen con los objetivos del Acuerdo de París, incluida la implantación a gran escala de la RDC y la entrega de emisiones netas iguales a cero (IPCC, 2018) es evidente que cualquier indicación de que la disuasión de la mitigación, en forma de riesgo moral, pueda ocurrir podría crear una importante consideración de gobernanza (Florin et al., 2020). Ante la incertidumbre que genera el cambio climático y la irregularidad de los gobiernos y otros actores en actuar decididamente frente al cambio climático, se debe evitar transmitir optimismo en estas tecnologías.

D. Compensaciones riesgo-riesgo

Las compensaciones riesgo-riesgo, que se aplican a todas las técnicas de RDC en cierta medida, caracterizan tanto las opciones de diseño de políticas y gobernanza emergentes, como la forma en que se lleva a cabo y se comunica la investigación. Implican compensaciones de riesgo tanto en términos de resultados como de opciones de gobernanza (Honegger, 2020).

En el contexto político, las compensaciones riesgo-riesgo identificadas por Honegger (2020) incluyen: la gobernanza efectiva frente a la eficiencia de la gobernanza, a nivel local, regional y global; los efectos transfronterizos de los enfoques de la RDC como desafíos a la soberanía de las políticas nacionales; el logro de la mitigación más eficaz frente a la garantía y el mantenimiento de los beneficios del desarrollo sostenible; y, el equilibrio de la gobernanza centralizada y policéntrica.

En relación con la investigación, se sugiere que las posibles compensaciones incluyen: equilibrar el conocimiento académico y la innovación con el conocimiento y la comprensión cultural, en particular en relación con los enfoques de la RDC basados en la naturaleza; la disuasión de la mitigación impulsada por la investigación frente al estancamiento de la mitigación o el posible cese de la misma; la limitada cooperación y el diálogo internacional en materia de investigación que socava la capacidad de cooperación en materia de gobernanza; y las capacidades de investigación desequilibradas, tanto en términos de recursos como de infraestructura de apoyo, que generan importantes diferencias de poder (Honegger, 2020).

Hasta la fecha no se sabe cómo resolver estas compensaciones, pero en su exhaustivo análisis de las cuestiones, Honegger (2020) sugiere, en relación con el diseño de políticas, el fortalecimiento de las capacidades para la colaboración internacional entre organismos; la mejora de la comprensión de cómo los desafíos específicos de la gobernanza se ajustan a los mandatos de determinados organismos internacionales; y la realización de evaluaciones de políticas en el contexto de la planificación de políticas nacionales de mitigación. En relación con las compensaciones asociadas a la investigación, Honegger (2020) sugiere que se permita una investigación más diversa y transdisciplinaria, el intercambio de conocimientos técnicos, las conversaciones entre la ciencia y la política y la realización de investigaciones sobre las posibles interrelaciones en el contexto de los ODS.

E. Posibles implicaciones de las medidas y tecnologías de RDC para los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Las posibles implicaciones de la RDC en la consecución de los ODS son inciertas (Mace et al., 2021) y solo se dispone de información sobre las implicaciones a partir de actividades piloto o por inferencia de otras prácticas (Honegger et al., 2021). La mitigación del cambio climático y los beneficios colaterales de la RDC pueden beneficiar a la consecución de los ODS, pero las políticas de RDC mal diseñadas también podrían dificultar su consecución (Honegger et al., 2021). Las opciones específicas de RDC podrían, por ejemplo, generar conflictos por la tierra, el agua, la biomasa o los recursos de energía eléctrica y excluir a las comunidades de los beneficios de las políticas con efectos negativos en cascada para una serie de ODS (Honegger et al., 2021; Mace et al., 2021). En un estudio detallado de las posibles interrelaciones entre la RDC y los ODS, (Honegger et al., 2021) identificaron cuatro ideas políticas clave que hay que tener en cuenta:

- i) la estabilización del clima mundial es una condición previa para alcanzar, al menos parcialmente, los ODS, y la RDC puede ayudar a conseguirlo;
- ii) las técnicas de RDC pueden generar impactos locales y regionales, tanto positivos como negativos, sobre los ODS a través de canales físicos, sociales, económicos y políticos;
- iii) la escala de la aplicación de la RDC y las implicaciones para los ODS dependen en gran medida del diseño de las políticas y de los procesos de planificación nacional;
- iv) una mayor investigación sobre el diseño de las políticas de RDC ayudaría a identificar las sinergias entre los múltiples ODS y a prevenir los daños que se producen en ellos.

F. Incentivos

No está claro cómo la comunidad internacional podría acordar, fijar y estabilizar, a largo plazo, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y otras medidas de mitigación (Honegger, 2020). Tampoco está claro cómo este proceso, y los resultados de las decisiones tomadas, pueden equilibrar los intereses individuales de los estados-nación con la necesidad global de reducir concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Honegger, 2020). Abordar estos retos políticos puede justificar algún tipo de incentivo, pero hasta la fecha no se sabe cómo podría evolucionar (Florin et al., 2020).

Tampoco está claro cómo podría lograrse la escala y la velocidad de implementación que implican los escenarios del IPCC (IPCC, 2021; 2018) y se sugiere que los incentivos sustanciales para asegurar un cambio tan rápido, en términos de nuevas opciones financieras y políticas, son muy débiles, o todavía no existen (Mace et al., 2021; Florin et al., 2020). Para contar con incentivos se debe tener claros los costos, beneficios y riesgos de las diferentes alternativas, situación en la que aún no nos encontramos.

G. Secuestro y permanencia

Algunas técnicas descritas no tienen la capacidad de secuestrar el carbono capturado de forma duradera o permanente. Si volvieran a entrar en la atmósfera grandes cantidades de CO₂ debido a un fallo en el almacenamiento o a una fuga, se invertirían las ganancias obtenidas con la RDC. Esta cuestión plantea importantes retos de investigación, ingeniería y gobernanza, tal y como ha señalado la National Academy of Engineering (NAS, 2019), entre los que se encuentran, por ejemplo, la gestión a largo plazo del carbono secuestrado a lo largo de un siglo, la prevención de fugas en entornos difíciles o de difícil acceso, y la financiación o los incentivos (NAS, 2019).

Otros retos pendientes en materia de gobernanza

Además de las cuestiones de gobernanza específicas de la técnica y genéricas señaladas, una reciente revisión de los retos de la gobernanza de la RDC (Mace et al., 2021) identifica otros dos temas de relevancia para la gobernanza de la RDC que requieren atención:

- i) la atribución de la responsabilidad y las cuestiones éticas en torno a la implementación; y
- ii) mecanismos para identificar la responsabilidad y reparar el daño.

La función del derecho y los marcos internacionales

Hay una serie de marcos internacionales que son relevantes para la RDC, entre ellos:

- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (ONU 1992);
 - Acuerdo de París 2015 (UNFCCC, 2015);
 - Protocolo de Kioto
- Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB);
- Convenio de Londres de 1972 y Protocolo de Londres de 1996 (International Maritime Organization, 2016);
- Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978 (MARPOL, 1978),
- Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CNUDM) (ONU, 2009).

Todavía no se sabe cómo pueden evolucionar en el contexto del creciente uso de la RDC. (A. M. Hubert, 2020) ofrece un análisis de estos instrumentos y de cómo pueden relacionarse con el RDC.

VI. Caso de estudio: impacto de las medidas y/o tecnologías de remoción de dióxido de carbono sobre los objetivos de desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe

El estudio titulado "Impacto de las medidas y/o tecnologías de RDC sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en países seleccionados en América latina y el Caribe", realizado por J. Samaniego et al. (2021) se documenten los efectos sobre las seis³ medidas y/o tecnologías de remoción de dióxido de carbono (RDC) sobre indicadores económicos y ambientales respecto a los resultados de los respectivos escenario BAU (*Business as usual*), así como su impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en países seleccionados de ALC (Argentina y Colombia). Este estudio cuenta con una versión del documento en extenso, más un resumen para los tomadores de decisión (en tres idiomas: español, inglés y francés).

Los objetivos del estudio estuvieron centrados en identificar brechas de conocimiento y formular recomendaciones para la consideración de los gobiernos de la región de manera de estimular y organizar la incorporación de enfoques de RDC en las estrategias nacionales de cambio climático. Para dar respuesta a estos objetivos, el estudio se subdivide en tres ítems principales, que son abordados para cada una de las medidas, tecnologías y/o abordajes:







































- i) Estado del arte-conocimiento, planes y desarrollo.
- ii) Análisis de las RCD, escenarios para tecnologías y países seleccionados.
- iii) Análisis de las implicancias económicas, sociales y ambientales.





Del punto a), estado del arte, se realizó una intensa búsqueda bibliográfica, que permitiese identificar, en tres grandes rasgos lo siguiente: Políticas, Planes y Programas implementados a nivel nacional; investigaciones científicas realizadas; iniciativas y desarrollo de proyectos a gran escala. Fue evaluada cada medida, dando como resultado la brecha existente entre conocimiento y desarrollo empírico en los países de ALC (usando metodología desarrollada por C2G⁴). A forma de resumir estos resultados, véase el cuadro 6.

³ Forestación y restauración; bioenergía con captura y almacenamiento de dióxido de carbono (BECCS); mejora del contenido de carbono en el suelo con biocarbón (*biochar*); captura directa y almacenamiento del CO₂ atmosférico (DACCS o CCS); fertilización del océano.

⁴ Medición de este impacto de las medidas de RDC sobre los ODS: (https://www.c2g2.net/wp-content/uploads/C2G2-Geoeng-SDGs_20180521.pdf).

Cuadro 6
Estado actual del conocimiento y el desarrollo en Argentina y Colombia





	Forestación	BECCS	Biochar	MR & Alc. Océanos	DACCS	Fert. Océanos
Conocimiento científico y técnico						
Tendencias en planes de gobierno						
Implementación de iniciativas y proyectos						
	Forestación	BECCS	Biochar	MR & Alc. Océanos	DACCS	Fert. Océanos
Conocimiento científico y técnico						
Tendencias en planes de gobierno						
Implementación de iniciativas y proyectos						

 No desarrollado
  En desarrollo no directamente/parcialmente relacionado a RDC
  Menos de 10 artículos/programas aún no ejecutados/iniciáticas de pequeña escala
  Más de 10 artículos/programas en ejecución o ejecutados/iniciáticas de gran escala completos

Fuente: Elaboración propia con base en Samaniego et al. (2021).

Con base en los resultados reportados en el cuadro anterior, la forestación y restauración, así como la mejora del suelo con *Biochar* son los enfoques de RDC más explorados en la investigación y academia en ALC. Se resumen los resultados principales (cuadro 7).

Cuadro 7
Resultados principales de las medidas y/o tecnologías de RDC estudiadas

Forestación y restauración	<ul style="list-style-type: none"> Respaldo por leyes, regularizaciones y planes nacionales en Argentina, Colombia y gran parte de los países en LAC. Diversos proyectos a gran escala identificados. Políticas y programas promoviendo el uso de madera de bosques gestionados sosteniblemente para industria y construcción (principalmente Argentina, Brasil y Chile). 	
Mejora del suelo con Biocarbón e Intemperización reforzada y mejora de la meteorización de las rocas	<ul style="list-style-type: none"> Actividades académicas y de investigación identificada, pero aun enfocada en pruebas de laboratorio de pequeña escala. Mejora de contenido de carbono en suelo y tecnología que incluyen el uso de <i>biochar</i> como mejorador de suelo y para la mejora de meteorización de rocas deberán ser analizadas más profundamente para cuantificar sus potenciales impactos y riesgos. 	
BECCS	<ul style="list-style-type: none"> Existe una base adecuada de investigación en la bioenergía, pero aún no hay investigación integral del BECCS. Capacidad instalada de generación a partir de biomasa y biogás incipiente, pero incrementándose rápidamente, y plantas de biocombustibles (foco en BE). Potencial de BECCS para generación distribuida. 	
Otros RDC	<ul style="list-style-type: none"> Investigación académica indirecta sobre conducta de océanos y caracterización de dinámica de CO₂, pero no hay demasiada investigación/proyectos de alcalinización/fertilización de océanos. Brasil lidera las capacidades de investigación en CCS en LAC, enfocado en almacenamiento geológico en aguas ultra profundas. Conocimiento desarrollado en DACCS es aún escaso en LAC. 	


Fuente: Elaboración propia con base en Samaniego et al. (2021).

En general, y con raras excepciones, se ha identificado una importante brecha de conocimiento y desarrollo empírico en los países de ALC:

- Los esfuerzos de los países de LAC en materia de mitigación del cambio climático se centran principalmente en la reducción de las emisiones y la sustitución de los combustibles fósiles, y sólo de manera muy incipiente se están considerando los esfuerzos de eliminación del carbono.
- Se esperaría que el despliegue de enfoques de RDC a gran escala tuviera efectos secundarios físicos y repercusiones socioeconómicas o de gobernanza que afectan de diferentes maneras al logro de los SDG.
- Hasta ahora no se han explorado ni comprendido suficientemente, desde la perspectiva de la planificación las repercusiones más amplias de las tecnologías de RDC en la contribución u obstaculización a los esfuerzos de desarrollo sostenible.
- Los países de ALC se enfrentan a un persistente déficit de financiación; la decisión sobre el posible desarrollo de esas opciones requeriría una información precisa sobre los costos de abatimiento y un examen cuidadoso de los riesgos de la aplicación a fin de evitar una mala asignación de los escasos recursos.
- Se debe realizar un esfuerzo integral de investigación y desarrollo técnico para cada tecnología.

De la parte b) del estudio, sobre el análisis de las RCD, escenarios para tecnologías y países seleccionados, se evaluó el escenario BAU de cada medida, comparándola con indicadores ambientales, sociales y económicos. En este sentido, se muestran los resultados para Argentina (cuadro 8).

Cuadro 8
Argentina: impacto del despliegue de RDC en indicadores clave

		Potencial de emisiones de GEI (absorbidas)	Promedio de inversiones requeridas	Costo	Creación neta de empleo	Contribución al PIB
		Mega t CO ₂ /año	MM USD/año	USD/t CO ₂	número de empleos creados/Mega t CO ₂ sec	Δ MMUSD PIB/Mega t CO ₂ sec
Forestación	Base	5,6 (prom) 7,7 (2050)	29 (prom)	5,1	73 directos 117 indirectos	22
	Escenario 1	10,3 (prom) 11,3 (2050)	59 (prom)	5,6	80 directos 127 indirectos	24
	Escenario 2	15,9 (prom) 14,4 (2050)	100 (prom)	6,1	85 directos 136 indirectos	26
		Mega t CO ₂ /año	MM USD/año	USD/t CO ₂	número de empleos creados/Mega t CO ₂ sec	Δ MMUSD PIB/Mega t CO ₂ sec
BECCS	Escenario 1	0,1 (prom) 0,3 (2050)	35 (prom)	256,5	733 permanentes 258 constr.	1,075
	Escenario 2	0,7 (prom) 2,0 (2050)	163 (prom)	239	1,037 permanentes 360 constr.	1,000
		Mega t CO ₂ /año	MM USD/año	USD/t CO ₂	número de empleos creados/Mega t CO ₂ sec	Δ MMUSD PIB/Mega t CO ₂ sec
Biochar	Escenario 1	0,1 (prom) 0,2 (2050)	3 (prom)	25,4	102 industrial	110
	Escenario 2	1,5 (prom) 2,5 (2050)	30 (prom)	19,3	77 industrial	84

Fuente: Elaboración propia con base en Samaniego et al. (2021).

Los resultados principales para Argentina, en cada uno de los indicadores evaluados, se listan a continuación:

- La forestación y la reforestación presentan el menor costo por tonelada secuestrada (~ 6 USD/ TonCO₂-eq) y la mayor remoción de emisiones para Argentina, y deben ser priorizadas en el corto plazo. A pesar de su bajo costo de abatimiento, los escenarios estiman inversiones de alrededor de 60-100 MMUSD/año y proporcionan una fuente importante de empleo directo. Podría ser posible realizar inversiones, trayendo consigo efectos en el empleo y el PIB, mayores que los estimados si la cadena de valor industrial de la madera se desarrolla significativamente.
- Los cambios en las prácticas de producción ganadera, en particular las que aumentan las existencias de carbono (C) en el suelo, pueden proporcionar más medios para aumentar la ambición de la mitigación al corto y mediano plazo.
- De manera similar, los cambios en las prácticas agrícolas actuales, pero en evolución (y, por lo tanto, técnica y culturalmente factibles) pueden contribuir a reducciones incrementales de emisiones.
- La aplicación de biocarbón en el suelo podría secuestrar hasta 2.5 Megatoneladas de CO₂-eq/año para el 2050, considerando solo árboles frutales. Una mayor expansión a otros cultivos intensivos y luego a cultivos extensivos podría ser una ventaja para explorar con más investigación y proyectos piloto. Además, el despliegue del *biochar* presenta el segundo costo de reducción más bajo.
- Existe incertidumbre sobre la viabilidad de la ampliación oportuna de la BECCS y DACCS están en gran parte ausentes de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) de Argentina y ocupan un lugar bajo en las prioridades de inversión. Se estima que la BECCS podrían secuestrar hasta 2.0 Megatoneladas de CO₂-eq/año para el 2050, con más de 1.300 MW de capacidad instalada adicional.
- El despliegue de las BECCS a medio plazo implica grandes inversiones en instalaciones industriales intensivas en capital y, por lo tanto, presenta un PIB y multiplicadores de empleo elevados. Sin embargo, la BECCS es todavía una tecnología inmadura en Argentina con el mayor costo de abatimiento (240 a 260 USD/ TonCO₂-eq), entre los enfoques de RDC analizados.

A continuación, en el cuadro 9 se muestran los resultados para Colombia:

Cuadro 9
Colombia: impacto del despliegue de RDC en indicadores clave

		Potencial de emisiones de GEI (absorbidas)	Promedio de inversiones requeridas	Costo	Creación neta de empleo	Contribución al PIB
		Mega t CO ₂ /año	MM USD/año	USD/t CO ₂	número de empleos creados/Mega t CO ₂ sec	Δ MMUSD PIB/Mega t CO ₂ sec
Forestación	Base	4,7 (prom) 6,3 (2050)	48 (prom)	9,7	76 directos 122 indirectos	62
	Escenario 1	7,5 (prom) 8,1 (2050)	78 (prom)	10,1	74 directos 118 indirectos	65
	Escenario 2	13,4 (prom) 12,0 (2050)	144 (prom)	10,5	66 directos 106 indirectos	67
		Mega t CO ₂ /año	MM USD/año	USD/t CO ₂	número de empleos creados/Mega t CO ₂ sec	Δ MMUSD PIB/Mega t CO ₂ sec
Restauración de Manglares	Escenario 1	0,4 (prom) 0,8 (prom)	5 (prom)	11,1	65 directos	69
	Escenario 2	1,4 (prom) 2,9 (2050)	15 (prom)	10,9	69 directos	68

		Potencial de emisiones de GEI (absorbidas)	Promedio de inversiones requeridas	Costo	Creación neta de empleo	Contribución al PIB
		Mega t CO ₂ /año	MM USD/año	USD/t CO ₂	número de empleos creados/Mega t CO ₂ sec	Δ MMUSD PIB/Mega t CO ₂ sec
BECCS	Escenario 1	0,1 (prom) 0,4 (2050)	12 (prom)	72,9	271 permanentes 104 constr.	453
	Escenario 2	2,1 (prom) 4,7 (2050)	14,6 (prom)	69,2	259 permanentes 101 constr.	429
		Mega t CO ₂ /año	MM USD/año	USD/t CO ₂	número de empleos creados/Mega t CO ₂ sec	Δ MMUSD PIB/Mega t CO ₂ sec
<i>Biochar</i>	Escenario 1	0,3 (prom) 0,4 (2050)	7 (prom)	25,0	100 industrial	161
	Escenario 2	3,1 (prom) 4,8 (2050)	58 (prom)	18,0	72 industrial	116

Fuente: Elaboración propia con base en Samaniego et al. (2021).

- Controlar la deforestación es clave para reducir las emisiones en Colombia. Además, dada la necesidad de producir más alimentos y biomasa mediante la intensificación de la agricultura y la producción ganadera, detener la deforestación surge como un imperativo para facilitar la adopción de una descarbonización profunda y una producción alimentaria sostenible a largo plazo.
- La forestación también presenta el mayor potencial de emisiones de GEI en Colombia, con un promedio de más de 13 Megatonnes de CO₂-eq/año, en el período 2020-2050.
- Colombia es uno de los 20 países del mundo en términos de cobertura de manglares, con cerca de 300.000 ha de manglares en las costas del Pacífico y el Caribe. Los manglares son bien conocidos por su alta capacidad para capturar reservas de carbono por unidad de tierra en comparación con los bosques terrestres. Se espera que la restauración de manglares a una tasa anual del 0,7% (58 mil ha restauradas en los próximos 30 años) pueda secuestrar hasta 3 Megatonnes de CO₂-eq/año, con inversiones y costos relativamente bajos por tonelada de CO₂.
- Los efectos en el empleo y la contribución al PIB de las intervenciones de forestación y restauración de manglares podrían subestimarse si también se considerarían otras actividades económicas indirectas derivadas de su cadena de valor y ecosistema respectivamente (no incluidas en las figuras siguientes) más allá de las actividades de plantaciones primarias.
- Solo considerando el despliegue en plantaciones de árboles frutales, la aplicación de *Biochar* en suelo colombiano podría secuestrar hasta 5 Megatoneladas de CO₂-eq/año para el 2050. Como se mencionó en Argentina, una mayor expansión a otros cultivos intensivos y luego a cultivos extensivos podría ser una ventaja para explorar con más investigaciones y pilotos en Colombia. Aunque es más alto que la forestación y la restauración de manglares, se espera que el costo de aplicación de *Biochar* por tonelada permanezca por debajo de los 25 USD/TonCO₂-eq.
- Se pronostican más de 1,100 MW de capacidad instalada de BECCS para Colombia para 2050 en un escenario de alta adopción, potencialmente secuestrando casi 5 Megatoneladas de CO₂-eq/año. La BECCS está limitado por el potencial de bioenergía sostenible y la disponibilidad de almacenamiento seguro de CO₂. Al igual que en Argentina, en Colombia también existe incertidumbre sobre la viabilidad de la ampliación oportuna de la BECCS. La DACCS está en gran parte ausente de la NDC colombiana y ocupa un lugar bajo en las prioridades de inversión. La BECCS compite con otros enfoques RDC terrestres y las medidas de mitigación por los recursos.

- Los requisitos de inversión más grandes, como el despliegue de la BECCS intensivo en capital y las plantas de producción de biocarbón, generan mayores efectos en la creación de empleo y la contribución al PIB. Aunque significativamente más bajo que en Argentina, BECCS presenta el costo de reducción de CDR más alto en Colombia con una estimación de alrededor de 70 USD /TonCO₂-eq.

Para desarrollar el punto c) sobre el análisis de las implicancias económicas, sociales y ambientales, se desarrollan las limitaciones del análisis llevado a cabo en el estudio. Para ello, se generan las consideraciones y/o advertencia y las limitaciones a tener en cuenta para abordar las medidas de RDC en la región (diagrama 2).



Fuente: Elaboración propia con base en Samaniego et al. (2021).

A continuación, se presentan recomendaciones, que tienen por objeto permitir la toma de decisiones sobre el posible despliegue de las medidas, tecnologías y/o abordajes de RDC a gran escala en LAC:

- Dadas las complejidades y la incertidumbre que subsiste en algunos de los enfoques de RDC analizados, se requiere un progreso al menos en:
 - Elaboración de modelos integrados de evaluación a nivel nacional y sectorial.
 - Análisis de costo-beneficio.
 - Análisis de riesgos.
 - Intensificación de las investigaciones científicas y técnicas en curso.
 - Múltiples proyectos piloto.
- Como los países de LAC podrían enfrentarse a un persistente déficit financiero público (acentuado por la pandemia), las decisiones sobre el posible desarrollo de RDC requieren de información precisa sobre los costos de abatimiento y un examen y evaluación cuidadosos de los riesgos de su aplicación.
- La evaluación general de la viabilidad técnica y económica de los enfoques RDC debe integrarse en el marco que proporcionarán las estrategias a largo plazo elaboradas por los países, incluida la próxima generación de NDCs.

- Plataformas y programas de trabajo colaborativos en la región y una necesidad común de financiación climática internacional adicional para hacer frente a la necesidad de recursos
- La posibilidad de reunir fuertes flujos de financiación en el contexto del artículo 6 podría contribuir a financiar la transición necesaria a largo plazo en LAC.
- Se requiere una investigación transdisciplinaria y diversa desde el punto de vista geográfico sobre los vínculos entre el despliegue de enfoques de RDC a gran escala y la consecución del desarrollo sostenible, que puede incluir la elaboración de principios o parámetros de evaluación comunes.
- Se necesitan evaluaciones integradas del impacto de las políticas para concebir los mejores diseños de políticas potenciales para movilizar las opciones RDC y qué implicaciones tendrían para el logro de los ODS.

VII. Conclusiones

Si se quiere limitar el calentamiento global lo suficiente como para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, los escenarios del IPCC (IPCC, 2021; 2018) implican claramente que, además de las reducciones transformacionales de emisiones, habría que adoptar técnicas de RDC como parte de la respuesta. En este documento se han descrito las metas climáticas globales y los compromisos nacionales derivados del Acuerdo de París, insertando a su vez el contexto regional de mitigación y adaptación y el nivel de ambición de las NDC actuales. En este desarrollo, se ha ahondado sobre cómo se insertan las RDC y su importancia para la región, que, con base en estudios recientes para ALC, las oportunidades en sectores más basados en la naturaleza, los cuales predominarán para ser implementados y considerados en las NDC nacionales.

En el caso de estudio que aborda el problema de la desertificación de los suelos a nivel regional, se deja en evidencia la necesidad de considerar las interrelaciones entre los sistemas productivos y sus bases de recursos naturales en las distintas áreas geográficas, donde, la degradación afecta a la productividad y los empleos y, por ende, a la economía regional. La exploración de una serie de medidas y tecnologías de RDC comúnmente tratadas en la bibliografía, han permitido conocer la posibilidad de opciones disponibles de estas medidas, pero a la vez sobre las lagunas de conocimiento que todavía existen para su implementación. Con base en ello, se pauta sobre una serie de programas de gobernanza que deben considerarse para informar las futuras decisiones sobre el desarrollo, implantación o gestión a largo plazo de las medidas y tecnologías de RDC. Por último, se ha realizado un resumen del estudio hecho sobre el impacto que tendría el despliegue de estas medidas, que dan una mirada general de los co-beneficios que el despliegue de las mismas traería consigo.

Independientemente de las concepciones sobre el combate al cambio climático que se tengan, los retos de mitigación y adaptación exigen considerar todas las opciones. Los RDC, por su complejidad, requieren de profundizar en su conocimiento técnico, de políticas e instrumentos, para estar en condiciones de participar en los debates internacionales que ya están ocurriendo y para tomar las medidas que sean necesarias de forma lo más informada posible. En este contexto, en América Latina y el Caribe se necesita profundizar en el conocimiento y en los debates sobre las RDC.

Bibliografía

- Amann, T., Hartmann, J., Struyf, E., de Oliveira Garcia, W., Fischer, E. K., Janssens, I., Meire, P., & Schoelynck, J. (2020), Enhanced Weathering and related element fluxes—a cropland mesocosm approach. *Biogeosciences*, 17(1), 103–119. <https://doi.org/10.5194/bg-17-103-2020>.
- Anderson, P. (2020), Climate Intervention with Biochar: A White Paper about Biochar and Energy (BC&E) for Carbon Dioxide Removal (CDR) and Emission Reduction (ER). *Woodgas Pyrolytics, Inc.* <https://woodgas.energy/wp-content/uploads/2020/12/Climate-Intervention-With-Biochar.pdf>.
- Arévalos, F., Ortiz, E., Báez, M., Benítez, C., Allegretti, L., & Duré, A. (2018), *Monitoreo Mensual del Cambio de Uso y Cobertura de la Tierra, Incendios y Variación de la Cubierta de Aguas en el Gran Chaco Americano*.
- Asilomar Scientific Organizing Committee. (2010), *The Asilomar conference report. Principles for Research into Climate Engineering Techniques. Conference Report*. <http://www.climateactionfund.org/images/Conference/finalfinalreport.pdf>.
- Aure, J., Strand, Ø., Erga, S., & Strohmeier, T. (2007), Primary production enhancement by artificial upwelling in a western Norwegian fjord. *Marine Ecology Progress Series*, 352, 39–52. <https://doi.org/10.3354/meps07139>.
- Bakkegaard, R. et al. (2015), *Developing INDCs: A Guidance Note, Asociación PNUMA–DTU*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/developing-indcs-a-guidance-note>.
- Banco Centroamericano de Integración Económica, & FAO. (2019), *Reunión técnica: Corredor Seco Centroamericano y soluciones de desarrollo*. <https://www.fao.org/americas/eventos/ver/es/?uid=1196866>.
- Banco Mundial. (2010), *The Cost to Developing Countries of Adapting to Climate Change. New Methods and Estimates*.
- Barbier, E. B., & Hochard, J. P. (2016), Does Land Degradation Increase Poverty in Developing Countries? *PLOS ONE*, 11(5), e0152973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152973>.
- Bárcena, A., Samaniego, J., Galindo, L. M., Ferrer Carbonell, J., Alatorre, J. E., Stockins, P., Reyes, O., Sánchez, L., & Mostacedo, J. (2018), *LA ECONOMÍA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. UNA VISIÓN GRÁFICA*.
- Bárcena, A., Samaniego, J., Peres, W., & Alatorre, J. E. (2020), *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/S1900711_es.mobi.
- Bayraktarov, E., Saunders, M. I., Abdullah, S., Mills, M., Beher, J., Possingham, H. P., Mumby, P. J., & Lovelock, C. E. (2016), The cost and feasibility of marine coastal restoration. *Ecological Applications*, 26(4), 1055–1074. <https://doi.org/10.1890/15-1077>.

- Beerling, D. J., Kantzas, E. P., Lomas, M. R., Wade, P., Eufrazio, R. M., Renforth, P., Sarkar, B., Andrews, M. G., James, R. H., Pearce, C. R., Mercure, J.-F., Pollitt, H., Holden, P. B., Edwards, N. R., Khanna, M., Koh, L., Quegan, S., Pidgeon, N. F., Janssens, I. A., Banwart, S. A. (2020), Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583(7815), 242–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>.
- Bhave, A., Taylor, R. H. S., Fennell, P., Livingston, W. R., Shah, N., Dowell, N. mac, Dennis, J., Kraft, M., Pourkashanian, M., Insa, M., Jones, J., Burdett, N., Bauen, A., Beal, C., Smallbone, A., & Akroyd, J. (2017), Screening and techno-economic assessment of biomass-based power generation with CCS technologies to meet 2050 CO₂ targets. *Applied Energy*, 190, 481–489. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.120>.
- BID (2018), *Proceso Regional de las Américas: Foro Mundial del Agua 2018: Informe regional América Latina y el Caribe: Resumen ejecutivo*. <https://doi.org/10.18235/0001028>.
- BID, & DDPLAC (2019), *Cómo Llegar a Cero Emisiones Netas: Lecciones de América Latina y el Caribe*.
- BMRS (2019), *Programa de investigación sobre la conversión de algas en bioproductos*. <https://www.bmrs.ie/bmrs-projects#seaweed-conversion-to-bio-products>.
- C2G (2021), *Remoción del dióxido de carbono Carnegie Climate Governance Initiative—informes y recursos educativos para la gobernanza de RDC*. <https://www.c2g2.net/carbon-dioxide-removal/>.
- C2G2 (2018), *Governing Carbon Dioxide Removal*. <https://www.c2g2.net/wp-content/uploads/Carbon-Dioxide-Removal-Nov-2018.pdf>.
- Cardozo, R., Caballero, J., Arévalos, F., Bazán, D., & Palacios, F. (2013), *INFORME TÉCNICO. Resultados del Monitoreo Mensual de los Cambios de Uso de la Tierra, Incendios e Inundaciones en el*. https://www.academia.edu/11429083/INFORME_T%C3%89CNICO_Resultados_del_Monitoreo_Mensual_de_los_Cambios_de_Uso_de_la_Tierra_Incendios_e_Inundaciones_en_el.
- CEPAL (2020), *Construir un nuevo futuro: una recuperación transformadora con igualdad y sostenibilidad*. In (LC/SES.38/3-P/Rev.1).
- _____. (2019), *CEPALSTAT | Bases de Datos y Publicaciones Estadísticas*. CEPAL. <https://estadisticas.cepal.org/cepalstat/portada.html>.
- _____. (2015), *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: paradojas y desafíos del desarrollo sostenible*. In *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. LC/G.2624.
- _____. (n.d.), *NDC LAC*. Retrieved March 15, 2022, from <https://ndclac.cepal.org/es/acerca-de>.
- CEPAL, & C2G (2022), *Herramienta interactiva sobre el impacto de las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe*.
- CEPAL, & OIT (2018a), *Environmental sustainability and employment in Latin America and the Caribbean*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44186/1/S1800885_en.pdf.
- _____. (2018b), *"Sostenibilidad medioambiental con empleo en América Latina y el Caribe"*, *Coyuntura Laboral en América Latina y el Caribe*, N° 19 (LC/TS.2018/85).
- CG, B., Bonn, A., Stoneman, R., Chapman, S., Coupar, A., Evans, M., Geary, B., Howat, M., Joosten, H., Keenleyside, C., Lindsay, R., Labadz, J., Littlewood, N., Lunt, P., CJ, M., Moxey, A., Orr, H., Reed, M., Smith, P., & Worrall, F. (2011), *IUCN UK Commission of inquiry on peatlands*.
- Chará, J., Ernesto, R., Otte, J., Peri, P., Arce, E., & Schneider, F. (2019), *Silvopastoral Systems and their Contribution to Improved Resource Use and Sustainable Development Goals: Evidence from Latin America*.
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., & von Maltitz, G. (2018), *World Atlas of Desertification* (Issue KJ-07-17-008-EN-C (print), KJ-07-17-008-EN-N (online)). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/06292> (online), 10.2760/9205 (print).
- CLIMEWORKS (2019), *Clime Works*. <https://climeworks.com/>.
- Cox, E., Spence, E., & Pidgeon, N. (2020), Incumbency, Trust and the Monsanto Effect: Stakeholder Discourses on Greenhouse Gas Removal. *Environmental Values*, 29(2), 197–220. <https://doi.org/10.3197/096327119X15678473650947>.
- Daggash, H., Fajardy, M., Heptonstall, P., Dowell, N., & Gross, R. (2019), *Bioenergy with carbon capture and storage, and direct air carbon capture and storage: Examining the evidence on deployment potential and costs in the UK*. *UK Energy Research Centre Technology and Policy Assessment Imperial College Centre for Energy Policy and Technology*. <https://ukerc.ac.uk/project/bioenergy-with-ccas/>.

- de Oliveira Garcia, W., Amann, T., Hartmann, J., Karstens, K., Popp, A., Boysen, L. R., Smith, P., & Goll, D. (2020), Impacts of enhanced weathering on biomass production for negative emission technologies and soil hydrology. *Biogeosciences*, 17(7), 2107–2133. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2107-2020>.
- Doelman, J. C., Stehfest, E., Vuuren, D. P., Tabeau, A., Hof, A. F., Braakhekke, M. C., Gernaat, D. E. H. J., Berg, M., Zeist, W., Daioglou, V., Meijl, H., & Lucas, P. L. (2020), Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and trade-offs. *Global Change Biology*, 26(3), 1576–1591. <https://doi.org/10.1111/gcb.14887>.
- Donato Nobre, A. (2014), *The Future Climate of Amazonia. Scientific Assessment Report*. https://d2ouvy59podg6k.cloudfront.net/downloads/the_future_climate_of_amazonia_report.pdf.
- Dooley, K., Harrould-Kolieb, E., & Talberg, A. (2021), Carbon-dioxide Removal and Biodiversity: A Threat Identification Framework. *Global Policy*, 12(S1), 34–44. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12828>.
- Edwards, D. P., Lim, F., James, R. H., Pearce, C. R., Scholes, J., Freckleton, R. P., & Beerling, D. J. (2017), Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. *Biology Letters*, 13(4), 20160715. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0715>.
- Eisaman, M. D., Rivest, J. L. B., Karnitz, S. D., de Lannoy, C.-F., Jose, A., DeVaul, R. W., & Hannun, K. (2018), Indirect ocean capture of atmospheric CO₂: Part II. Understanding the cost of negative emissions. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 70, 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.02.020>.
- ELD Initiative (2015), *The value of land: Prosperous lands and positive rewards through sustainable land management*. https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/ELD-main-report_05_web_72dpi.pdf.
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarsa, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I. F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. v., Tobella, A. B., Ilstedt, U., Teuling, A. J., Gebrehiwot, S. G., Sands, D. C., Muys, B., Verbist, B., ... Sullivan, C. A. (2017), Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>.
- Fan, W., Zhang, Z., Yao, Z., Xiao, C., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, J., Di, Y., Chen, Y., & Pan, Y. (2020), A sea trial of enhancing carbon removal from Chinese coastal waters by stimulating seaweed cultivation through artificial upwelling. *Applied Ocean Research*, 101, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102260>.
- FAO (2019), *FAOSTAT | Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- _____. (2018), *EL ESTADO DE LOS BOSQUES DEL MUNDO. LAS VÍAS FORESTALES HACIA EL DESARROLLO SOSTENIBLE*. <https://www.fao.org/3/i9535es/i9535es.pdf>.
- _____. (2017), *Sustainable woodfuel for food security. A smart choice: green, renewable and affordable*. <https://www.fao.org/3/l7917EN/l7917en.pdf>.
- _____. (2014), *The State of World Fisheries and Aquaculture. Opportunities and challenges*. www.fao.org/documents/card/en/c/097d8007-49a4-4d65-88cd-fcaf6a969776/.
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019), Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>.
- Fearnside, P. M. (2005), *Desmatamento na Amazônia brasileira: História, índices e conseqüências. Megadiversidade 1(4): 113–123*. http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2005/Desmatamento%20historia-Megadiversidade.pdf.
- Florin, M.-V., Rouse, P., Hubert, A.-M., Honegger, M., & Reynolds, J. (2020), *International governance issues on climate engineering Information for policymakers*. <https://infoscience.epfl.ch/record/277726>.
- Fujikawa, S., Selyanchyn, R., & Kunitake, T. (2021), A new strategy for membrane-based direct air capture. *Polymer Journal*, 53(1), 111–119. <https://doi.org/10.1038/s41428-020-00429-z>.
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M., & Minx, J. C. (2018), Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>.
- Gambhir, A., & Tavoni, M. (2019), Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth*, 1(4), 405–409. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006>.
- GESAMP. (2019), *GESAMP Working Group 41: HIGH LEVEL REVIEW OF A WIDE RANGE OF PROPOSED MARINE GEOENGINEERING TECHNIQUES*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29818.03528>.

- GGREW. (2020), *The Greenhouse Gas Removal by Enhanced Weathering project*. <https://www.earth.ox.ac.uk/research-groups/ggrew-greenhouse-gas-removal-by-enhanced-weathering/>.
- Goeppert, A., Czaun, M., Surya Prakash, G. K., & Olah, G. A. (2012), Air as the renewable carbon source of the future: an overview of CO₂ capture from the atmosphere. *Energy & Environmental Science*, 5(7), 7833. <https://doi.org/10.1039/c2ee21586a>.
- González, M. F., & Ilyina, T. (2016), Impacts of artificial ocean alkalization on the carbon cycle and climate in Earth system simulations. *Geophysical Research Letters*, 43(12), 6493–6502. <https://doi.org/10.1002/2016GL068576>.
- Grassi, G. et al. (2017), *The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation*. *Nature Climate Change*, 7: 220–226.
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. v., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017), Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>.
- Hammad, H. M., Fasihuddin Nauman, H. M., Abbas, F., Ahmad, A., Bakhat, H. F., Saeed, S., Shah, G. M., Ahmad, A., & Cerdà, A. (2020), Carbon sequestration potential and soil characteristics of various land use systems in arid region. *Journal of Environmental Management*, 264, 110254. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110254>.
- Hansen, M. C., Potapov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S., Goetz, S., Loveland, T., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. (2013), High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science (New York, N.Y.)*, 342, 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
- Harrison, D. P. (2017), Global negative emissions capacity of ocean macronutrient fertilization. *Environmental Research Letters*, 12(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ef5>.
- Hasegawa, T., Fujimori, S., Havlík, P., Valin, H., Bodirsky, B. L., Doelman, J. C., Fellmann, T., Kyle, P., Koopman, J. F. L., Lotze-Campen, H., Mason-D'Croz, D., Ochi, Y., Pérez Domínguez, I., Stehfest, E., Sulser, T. B., Tabeau, A., Takahashi, K., Takakura, J., van Meijl, H., Witzke, P. (2018), Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nature Climate Change*, 8(8), 699–703. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>.
- Hickey, V., & Wellenstein, A. (2020, April 22), La naturaleza como motor de la recuperación en el mundo después del coronavirus. *Banco Mundial Blogs*. <https://blogs.worldbank.org/es/latinamerica/la-naturaleza-como-motor-de-la-recuperacion-en-el-mundo-despues-del-coronavirus>.
- Honegger, M. (2020), *Chapter 3: Addressing risks and trade-offs in governance' in Florin, M.-V. (Ed.), International governance issues on climate engineering. Information for policymakers; IRGC (2020)*. (pp. 72–91). <https://doi.org/10.5075/epfl-irgc-277726>.
- Honegger, M., Michaelowa, A., & Roy, J. (2021), Potential implications of carbon dioxide removal for the sustainable development goals. *Climate Policy*, 21(5), 678–698. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1843388>.
- Hosonuma, N., Herold, M., de Sy, V., de Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., Angelsen, A., & Romijn, E. (2012), An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>.
- Hubert, A. (2020), A Code of Conduct for Responsible Geoengineering Research. *Global Policy*, 12(S1), 82–96. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12845>.
- Hubert, A.-M. (2020), Chapter 2: International Legal and Institutional Arrangements relevant to the Governance of Climate Engineering Technologies. *International Governance Issues on Climate Engineering – Information for Policymakers. International Risk Governance Centre (IRGC). Lausanne, Switzerland: EPFL Scientific Publications*. <https://infoscience.epfl.ch/record/277726>.
- IEA (2017), *Energy Technology Perspectives 2017, IEA, Paris*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>.
- INPE (2020), *Nota Técnica. Estimativa de Prodes. Estimativa de desmatamento por corte raso na Amazônia Legal para 2020 é de 11.088 km2*. http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias-obt-inpe/estimativa-de-desmatamento-por-corte-raso-na-amazonia-legal-para-2020-e-de-11-088-km2/NotaTecnica_Estimativa_PRODES_2020.pdf.

- International Maritime Organization (2016), *The London Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter 1972*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/London-Convention-Protocol.aspx>.
- IPBES (2020), *Workshop Report on Biodiversity and Pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Daszak, P., Amuasi, J., das Neves, C. G., Hayman, D., Kuiken, T., Roche, B., Zambrana-Torrel, C., Buss, P., Dundarova, H., Feferholtz, Y., Földvári, G., Igbinosa, E., Junglen, S., Liu, Q., Suzan, G., Uhart, M., Wannous, C., Woolaston, K., Mosig Reidl, P., O'Brien, K., Pascual, U., Stoett, P., Li, H., Ngo, H. T., IPBES secretariat, Bonn, Germany, DOI:10.5281/zenodo.4147317. https://ipbes.net/sites/default/files/2020-12/IPBES%20Workshop%20on%20Biodiversity%20and%20Pandemics%20Report_o.pdf.
- IPCC (2005), *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf.
- IPCC (2013), "Summary for policymakers", *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. Stocker y otros (eds.), Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC (2018), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- IPCC (2019), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (D. C. Pörtner, V. Roberts, Masson-Delmotte P, M. T. E. Zhai, K. Poloczanska, A. Mintenbeck, M. Alegría, Nicolai A, J. Okem, B. Petzold, N. M. Rama, & Weyer, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- IPCC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. , P. Masson-Delmotte, A. Zhai, S. L. Pirani, C. P. S. Connors, N. Berger, Y. Caud, L. G. M. I. Chen, M. Gomis, K. Huang, E. Leitzell, J. B. R. Lonnoy, T. K. Matthews, T. Maycock, O. Waterfield, R. Y. Yelekçi, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press.
- IPCC, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Tabatabaei, M. (2018), *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.
- IUCN (2011), *The Bonn Challenge*. <https://www.bonnchallenge.org/>.
- Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A., & Hedmark, Å. (2010), Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: a Critical Review. *Wetlands*, 30(1), 111–124. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>.
- Keith, D. W. (2001), Sinks, Energy Crops and Land Use: Coherent Climate Policy Demands an Integrated Analysis of Biomass. *Climatic Change*, 49(1/2), 1–10. <https://doi.org/10.1023/A:1010617015484>.
- Kelemen, P. B., McQueen, N., Wilcox, J., Renforth, P., Dipple, G., & Vankeuren, A. P. (2020). Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO₂ removal from air: Review and new insights. *Chemical Geology*, 550, 119628. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119628>.
- Lal, R. (2013), Soil carbon management and climate change. *Carbon Management*, 4(4), 439–462. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.31>.
- _____. (2011), Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy*, 36, S33–S39. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.12.001>.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015), *Biochar for Environmental Management* (J. Lehmann & S. Joseph, Eds.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>.
- Lenton, T. M., & Vaughan, N. E. (2009), The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5539–5561. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5539-2009>.
- Li, X., Bellerby, R., Craft, C., & Widney, S. E. (2018), Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration. *Anthropocene Coasts*, 1–15. <https://doi.org/10.1139/anc-2017-0001>.
- Lockley, A. (2012), Comment on "Review of Methane Mitigation Technologies with Application to Rapid Release of Methane from the Arctic." *Environmental Science & Technology*, 46(24), 13552–13553. <https://doi.org/10.1021/es303074j>.

- Mace, M. J., Fyson, C. L., Schaeffer, M., & Hare, W. L. (2021), Large-Scale Carbon Dioxide Removal to Meet the 1.5°C Limit: Key Governance Gaps, Challenges and Priority Responses. *Global Policy*, 12(S1), 67–81. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12921>.
- Magrin, G. et al. (2014), "Central and South America", *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Volume II: Regional Aspects*, V. Barros y otros (eds.), Cambridge, Cambridge University Press. (2007), "Latin America", *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge, Cambridge University Press.
- MARPOL (1978), *Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978*. [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx).
- Matear, R. J. (2004), Enhancement of oceanic uptake of anthropogenic CO₂ by macronutrient fertilization. *Journal of Geophysical Research*, 109(C4), Co4001. <https://doi.org/10.1029/2000JC000321>.
- Maza, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2021), Predicting the evolution of coastal protection service with mangrove forest age. *Coastal Engineering*, 168, 103922. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103922>.
- McQueen, N., Psarras, P., Pilorgé, H., Liguori, S., He, J., Yuan, M., Woodall, C. M., Kian, K., Pierpoint, L., Jurewicz, J., Lucas, J. M., Jacobson, R., Deich, N., & Wilcox, J. (2020), Cost Analysis of Direct Air Capture and Sequestration Coupled to Low-Carbon Thermal Energy in the United States. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7542–7551. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00476>.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., Winowiecki, L. (2017), Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Bornmann, L., & Fuss, S. (2017), Fast growing research on negative emissions. *Environmental Research Letters*, 12(3), 035007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ee5>.
- Moore, C. M., Mills, M. M., Arrigo, K. R., Berman-Frank, I., Bopp, L., Boyd, P. W., Galbraith, E. D., Geider, R. J., Guieu, C., Jaccard, S. L., Jickells, T. D., la Roche, J., Lenton, T. M., Mahowald, N. M., Marañón, E., Marinov, I., Moore, J. K., Nakatsuka, T., Oschlies, A., Ulloa, O. (2013), Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nature Geoscience*, 6(9), 701–710. <https://doi.org/10.1038/ngeo1765>.
- Muñoz Ávila, L. (2016), "Derechos de acceso en asuntos ambientales en Colombia: hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades", serie Medio Ambiente y Desarrollo, N° 164 (LC/L.4280), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), diciembre.
- National Academies of Sciences, E. and M. (2019), *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25259>.
- National Research Council. (2015), *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18805>.
- N'Yeurt, A. de R., Chynoweth, D. P., Capron, M. E., Stewart, J. R., & Hasan, M. A. (2012), Negative carbon via Ocean Afforestation. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(6), 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.008>.
- Observatório ABC. (2017), *Impactos econômicos e ambientais do Plano ABC. RELATÓRIO COMPLETO*. <http://observatorioabc.com.br/wp-content/uploads/2017/09/Relatorio5-Completo.pdf>.
- Oliveira, P. P. A., Pezzopane, J. R. M., Pedroso, A. de F., Nicodemo, M. L. F., & Berndt, A. (2018), *Produção de carne carbono neutro: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos*. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1095333>.
- ONU. (2014), United Nations New York Declaration On Forests—Declaration and Action Agenda. *Climate Summit 2014*. https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Forests/New%20York%20Declaration%20on%20Forests_DAA.pdf.
- Oschlies, A., Pahlow, M., Yool, A., & Matear, R. J. (2010), Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channelling the sorcerer's apprentice. *Geophysical Research Letters*, 37(4). <https://doi.org/10.1029/2009GL041961>.
- Pan, Y., Fan, W., Zhang, D., Chen, J., Huang, H., Liu, S., Jiang, Z., Di, Y., Tong, M., & Chen, Y. (2016), Research progress in artificial upwelling and its potential environmental effects. *Science China Earth Sciences*, 59(2), 236–248. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5195-2>.
- Pereira, R., Yarish, C., & Critchley, A. T. (2013), Seaweed seaweed Aquaculture seaweed aquaculture for Human Foods in Land-Based and IMTA Systems. In *Sustainable Food Production* (pp. 1405–1424). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5797-8_189.

- Peri, P., Dube, F., & Varella, A. C. (2016), *Silvopastoral Systems in the Subtropical and Temperate Zones of South America: An Overview* (pp. 1–8). https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8_1.
- Pidgeon, N. F., & Spence, E. (2017), Perceptions of enhanced weathering as a biological negative emissions option. *Biology Letters*, 13(4), 20170024. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0024>.
- Pidgeon, N., Parkhill, K., Corner, A., & Vaughan, N. (2013), Deliberating stratospheric aerosols for climate geoengineering and the SPICE project. *Nature Climate Change*, 3(5), 451–457. <https://doi.org/10.1038/nclimate1807>.
- Rayner, S., Heyward, C., Kruger, T., Pidgeon, N., Redgwell, C., & Savulescu, J. (2013), The Oxford Principles. *Climatic Change*, 121(3), 499–512. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0675-2>.
- Renforth, P., Washbourne, C.–L., Taylder, J., & Manning, D. A. C. (2011), Silicate Production and Availability for Mineral Carbonation. *Environmental Science & Technology*, 45(6), 2035–2041. <https://doi.org/10.1021/es103241w>.
- Rodríguez, A., Clemente, S., Brito, A., & Hernández, J. C. (2018), Effects of ocean acidification on algae growth and feeding rates of juvenile sea urchins. *Marine Environmental Research*, 140, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.07.004>.
- Rouse, P. (2020), Chapter 1. A review of climate–altering technologies – in Florin, M.–V. (Ed.), *International Governance of Climate Engineering. Information for policymakers. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center (IRGC)*. <https://infoscience.epfl.ch/record/277726?ln=en>.
- RS, & RAE (2018), *Greenhouse gas removal*.
- Saget, C., Vogt–Schilb, A., & Luu, T. (2020), *El empleo en un futuro de cero emisiones netas en América Latina y el Caribe*. ZBW–Leibniz Information Centre for Economics. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:bw:esmono:224490>.
- Samaniego, J., Alatorre, J. E., Reyes, O., Ferrer, J., Muñoz, L., & Arpaia, L. (2019), *Panorama de las contribuciones determinadas a nivel nacional en América Latina y el Caribe, 2019: avances para el cumplimiento del Acuerdo de París*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/44974>.
- Samaniego, J., Alatorre, J. E., van der Borgh, R., & Ferrer, J. (2022), Panorama de las actualizaciones de las contribuciones determinadas a nivel nacional de cara a la COP 26. In *Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/190)*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Samaniego, J., Schmidt, K.–U., Carlino, H., Caratori, L., Carlino, M., Gogorza, A., & Rodríguez–Vagaría, A. (2021), *Current understanding of the potential impacts of Carbon Dioxide Removal approaches on the SDGs in selected countries in Latin America and the Caribbean. Final Report*. <https://www.cepal.org/es/node/54322>.
- Samari, M., Ridha, F., Manovic, V., Macchi, A., & Anthony, E. J. (2020), Direct capture of carbon dioxide from air via lime–based sorbents. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(1), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9845-0>.
- Sandalow, D., Friedmann, J., McCormick, C., & McCoy, S. (2018), *Direct Air Capture of Carbon Dioxide*. Innovation for Cool Earth Forum.
- Sanz–Pérez, E. S., Murdock, C. R., Didas, S. A., & Jones, C. W. (2016), Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chemical Reviews*, 116(19), 11840–11876. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00173>.
- Seddon, N. et al. (2020), "Understanding the value and limits of nature–based solutions to climate change and other global challenges", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 375, N° 1794.
- Sigman, D. M., & Haug, G. H. (2003), The Biological Pump in the Past. In *Treatise on Geochemistry* (pp. 491–528). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/06118-1>.
- Silver, M. W., Bargu, S., Coale, S. L., Benitez–Nelson, C. R., Garcia, A. C., Roberts, K. J., Sekula–Wood, E., Bruland, K. W., & Coale, K. H. (2010), Toxic diatoms and domoic acid in natural and iron enriched waters of the oceanic Pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(48), 20762–20767. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006968107>.
- Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R. B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J. G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., Yongsung, C. (2016), Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6(1), 42–50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>.

- Smith, P., Lanigan, G., Kutsch, W. L., Buchmann, N., Eugster, W., Aubinet, M., Ceschia, E., Béziat, P., Yeluripati, J. B., Osborne, B., Moors, E. J., Brut, A., Wattenbach, M., Saunders, M., & Jones, M. (2010), Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(3), 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.004>.
- SNH. (2019), *Peatland Action Scottish Natural Heritage*. <https://www.nature.scot/climate-change/taking-action/peatland-action>.
- Sondak, C. F. A., Ang, P. O., Beardall, J., Bellgrove, A., Boo, S. M., Gerung, G. S., Hepburn, C. D., Hong, D. D., Hu, Z., Kawai, H., Largo, D., Lee, J. A., Lim, P.-E., Mayakun, J., Nelson, W. A., Oak, J. H., Phang, S.-M., Sahoo, D., Peerapornpis, Y., Chung, I. K. (2017), Carbon dioxide mitigation potential of seaweed aquaculture beds (SABs). *Journal of Applied Phycology*, 29(5), 2363–2373. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-1022-1>.
- Soussana, J.-F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E. (Lini), Chotte, J.-L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., & Lal, R. (2019), Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 – soils for food security and climate' initiative. *Soil and Tillage Research*, 188, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002>.
- Stolaroff, J. K., Bhattacharyya, S., Smith, C. A., Bourcier, W. L., Cameron-Smith, P. J., & Aines, R. D. (2012), Review of Methane Mitigation Technologies with Application to Rapid Release of Methane from the Arctic. *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6455–6469. <https://doi.org/10.1021/es204686w>.
- Strassburg, B. B. N., Latawiec, A. E., Barioni, L. G., Nobre, C. A., da Silva, V. P., Valentim, J. F., Vianna, M., & Assad, E. D. (2014), When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, 28, 84–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>.
- The Institute For Carbon Removal Law and Policy (2018), *Carbon Removal Fact Sheet*.
- Torvanger, A. (2019), Governance of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS): accounting, rewarding, and the Paris agreement. *Climate Policy*, 19(3), 329–341. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1509044>.
- Trick, C. G., Bill, B. D., Cochlan, W. P., Wells, M. L., Trainer, V. L., & Pickell, L. D. (2010), Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(13), 5887–5892. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910579107>.
- UNCCD (2019), *The Global Land Outlook, Latin America and the Caribbean Thematic*.
- _____. (2017), *Perspectiva global de la tierra*. https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2017-09/GLO_Full_Report_low_res_Spanish.pdf.
- UNDP (2021), *The State of Climate Ambition. Nationally Determined Contributions (NDC) Global Outlook Report 2021*. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2021-11/UNDP-NDC-Global-Outlook-Report-2021-The-State-of-Climate-Ambition.pdf>.
- UNEP (2022, June 1), *Nueva reserva marina trae esperanza en América Latina, pero permanecen desafíos de conservación*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/nueva-reserva-marina-trae-esperanza-en-america-latina-pero>.
- UNFCCC (2021), *Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Synthesis report by the secretariat*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_o8s.pdf.
- _____. (2015), *El Acuerdo de París*. UNFCCC. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>.
- _____. (2007), *Investment and Financial Flows to Address Climate Change [en línea]*. http://unfccc.int/resource/docs/publications/financ_ia_flows.pdf.
- van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B., & Steele-Dunne, S. C. (2010), Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46(9). <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>.
- Viebahn, P., Scholz, A., & Zelt, O. (2019), The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program—Results of a Multi-Dimensional Analysis. *Energies*, 12(18), 3443. <https://doi.org/10.3390/en12183443>.
- Voskian, S., & Hatton, T. A. (2019), Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture. *Energy & Environmental Science*, 12(12), 3530–3547. <https://doi.org/10.1039/C9EE02412C>.
- Welch, B., Gauci, V., & Sayer, E. J. (2019), Tree stem bases are sources of CH₄ and N₂O in a tropical forest on upland soil during the dry to wet season transition. *Global Change Biology*, 25(1), 361–372. <https://doi.org/10.1111/gcb.14498>.

- Whiting, G. J., & Chanton, J. P. (2001), Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 53(5), 521–528. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v53i5.16628>.
- WILLAUER, H. D. , F., & HARDY, D. (2017), *Extraction of Carbon Dioxide and Hydrogen from Seawater by an Electrolytic Cation Exchange Module (E-CEM) Part V: E-CEM Effluent Discharge Composition as a Function of Electrode Water Composition*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1038769.pdf>.
- WMO (2021), *State of the Global Climate 2020 – Unpacking the Indicators*. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>.
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street—Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010), Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(1), 56. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>.
- World Resources Institute (n.d.), *Global Forest Watch*. Retrieved March 20, 2022, from <https://www.globalforestwatch.org/>.
- Wright, M. J., Teagle, D. A. H., & Feetham, P. M. (2014), A quantitative evaluation of the public response to climate engineering. *Nature Climate Change*, 4(2), 106–110. <https://doi.org/10.1038/nclimate2087>.
- WWF (2020), *Living Planet Report 2020 - Bending the curve of biodiversity loss* (R. E. A. Almond, Grooten M., & T. Petersen, Eds.).
- Zedler, J. B., & Kercher, S. (2005), WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30(1), 39–74. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>.
- Zomer, R. J., Bossio, D. A., Sommer, R., & Verchot, L. v. (2017), Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Scientific Reports*, 7(1), 15554. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>.



En un contexto de alta vulnerabilidad y tres crisis que afectan de manera simultánea a América Latina y el Caribe, es necesaria una transformación de los modelos de desarrollo en la región, que conduzca hacia una transición sostenible. En ese proceso, las políticas nacionales y locales deben ser capaces de aprovechar al máximo el potencial de la acción climática, a través de la adopción de nuevas tecnologías, la innovación, la reorganización productiva y la identificación de sinergias. Por esta razón, las soluciones basadas en la naturaleza y las medidas y tecnologías de remoción de dióxido de carbono cobran especial relevancia para contribuir al cumplimiento de las metas climáticas. En el presente documento, se examinan las oportunidades y los retos de la implementación a gran escala de estas medidas en la región, haciendo hincapié en la necesidad de acelerar los esfuerzos ya realizados, ampliar la frontera de investigación y gestionar los riesgos. Los resultados permiten reconocer las limitaciones existentes y los vínculos entre objetivos, políticas y herramientas, así como los cobeneficios que conlleva la implementación de dichas medidas.

