

INFORME A LAS NACIONES

Carbono neutralidad en Chile: desafíos y oportunidades para un país más justo y resiliente al clima



UNIVERSIDAD
DE CHILE

PATROCINA



UNIVERSIDAD
DE CONCEPCIÓN

INSTITUCIONES ASOCIADAS



UNIVERSIDAD
AUSTRAL DE CHILE



AGENCIA NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

FINANCIADA

Gobierno de Chile

INFORME A LAS NACIONES

Carbono neutralidad en Chile: desafíos y oportunidades para un país más justo y resiliente al clima



UNIVERSIDAD
DE CHILE

PATROCINA



UNIVERSIDAD
DE CONCEPCIÓN



UNIVERSIDAD
AUSTRAL DE CHILE

INSTITUCIONES ASOCIADAS



AGENCIA NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
Gobierno de Chile

FINANCIADA

Este informe es producto del trabajo interdisciplinario que realiza el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2.

El CR2 es un centro de excelencia financiado por el programa FONDAP de ANID (Proyecto 1523A0002) en el cual participan cerca de 60 investigadores e investigadoras de la Universidad de Chile, la Universidad de Concepción, la Universidad Austral de Chile y otras instituciones académicas.



Coordinación científica:

Cecilia Ibarra y Mauricio Galleguillos

Coordinación metodológica:

Bárbara Morales

Autores:

Cecilia Ibarra, Mauricio Galleguillos, Laura Farías, Jorge Herrera, Rocío Araya, Juan Pablo Boisier, Eugenia Gayó, Mauricio Osses, Claudia Rojas, Pilar Moraga, Daniel Núñez, Álvaro Gutiérrez, Dominique Hervé, Francisca Muñoz, Martín Jacques-Coper, Laura Ramajo, Rocío Urrutia-Jalabert, Roxana Bórquez, María Cristina Fragkou, Gabriela Guevara, Fabrice Lambert, Antonio Lara, Raúl O’Ryan, Jorge Pérez-Quezada, Pamela Smith, Magdalena Corona, Mauro E. González, Javier Lopatin, Ana María Ugarte, Paulina Aldunce, Noelia Carrasco, Nicolás Huneeus, Antoine Maillet, Óscar Seguel.

Colaboradores (por orden alfabético):

Catalina Aguirre, Claudia Alonso, Pilar Aparicio, Gabriela Azócar, Ximena Badilla, Gabriel Barrantes, Gustavo Blanco, Valentina Cariaga, Catalina Cortés, Felipe Díaz, Laura Gallardo, René Garreaud, Bárbara Morales, José Osses, Beatriz Pogorelow, Rodolfo Sapiains, María Ignacia Silva, Hanne Wiegel.

Revisión general:

José Barraza

Revisión científica (por orden alfabético):

Juan Pablo Boisier, Susana Bustos, René Garreaud, Eugenia Gayo, Mauro González, Martín Jacques-Coper, Pilar Moraga, Rodolfo Sapiains, Ana María Ugarte.

Coordinación comunicaciones:

Nicole Tondreau

Diseño:

M. Giselle Ogaz

Fotografías:

© Proyecto 4270 - Banco de Chile (Páginas 6, 8, 16, 25, 26, 38, 41, 46, 48, 60, 70, 72, 73, 77 y 80)

© Freepik.com (Páginas 13, 15, 36, 47, 57 y 65)

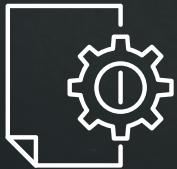
La presente publicación debe citarse como:

Ibarra, C., Galleguillos, M., Farías, L., Herrera, J., Araya, R., Boisier, J.P., Gayó, E., Osses, M., Rojas, C., Moraga, P., Núñez, D., Gutiérrez, A., Hervé, D., Muñoz, F., Jacques-Coper, M., Ramajo, L., Urrutia-Jalabert, R., Bórquez, R., Fragkou, M.C., Guevara, G., Lambert, F., Lara, A., O’Ryan, R., Pérez-Quezada, J., Smith, P., Corona, M., González, M. E., Lopatin, J., Ugarte, A.M., Aldunce, P., Carrasco, N., Huneeus, N., Maillet, A., & Seguel, O. (2026). Carbono neutralidad en Chile: desafíos y oportunidades para un país más justo y resiliente al clima. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 (ANID/FONDAP/1522A0002), 96 pp. <https://www.cr2.cl/informe-carbono-neutralidad>



Índice de contenidos

Introducción	7
Sección 1: Carbono neutralidad y gobernanza climática global	
Capítulo 1: Gobernanza climática global.....	10
Capítulo 2: El Acuerdo de París y la carbono neutralidad	11
Capítulo 3: Desarrollo resiliente al clima, justicia climática y carbono neutralidad.....	12
Capítulo 4: Carbono neutralidad e inventarios	13
Capítulo 5: Contabilidad de océanos y carbono azul.....	14
Capítulo 6 : Cuantificación de carbono en el suelo	14
Capítulo 7: La gobernanza de los datos climáticos	15
Sección 2: Carbono neutralidad y el ciclo del carbono	
Capítulo 8: El ciclo global del carbono	18
Capítulo 9: La relación del ciclo del carbono con el cambio climático que vivimos	20
Capítulo 10: Balance de carbono en Chile: reservorios y flujos en ecosistemas terrestres de Chile	23
Capítulo 11: Carbono azul: una oportunidad estratégica para Chile.....	25
Sección 3: Carbono neutralidad y gobernanza climática en Chile	
Capítulo 12: Marco normativo para la gobernanza climática y la carbono neutralidad	28
Capítulo 13: Reformas legales para lograr la carbono neutralidad	31
Capítulo 14: Sinergias entre adaptación y mitigación para lograr la carbono neutralidad ..	33
Capítulo 15: Transición Socioecológica Justa: eje para la carbono neutralidad y el desarrollo resiliente al clima en Chile	37
Sección 4: Carbono neutralidad e inventarios en Chile	
Capítulo 16: Inventarios y reporte de la carbono neutralidad.....	40
Capítulo 17: Emisiones de carbono en Chile.....	42
Capítulo 18: Capturas.....	45
Capítulo 19: Captura y contabilización de océanos y carbono azul en Chile	46
Capítulo 20: Desafíos de la gobernanza de datos climáticos para la carbono neutralidad en Chile.....	47
Sección 5: Desafíos científicos en la estimación del carbono en bosques	
Capítulo 21: Secuestro de carbono de los bosques de Chile.....	50
Capítulo 22: Alcances de las estimaciones de capturas y secuestro de carbono de nuestros bosques.....	53
Capítulo 23: Oportunidades de mejora en la cuantificación de los reservorios de carbono	56
Capítulo 24: Contribución de la modelación ecológica para conocer los balances de carbono presentes y futuros de bosques	58
Sección 6: Una mirada a la implementación de rutas justas para la carbono neutralidad en Chile	
Capítulo 25: Paisajes resilientes para la carbono neutralidad	62
Capítulo 26: Parcelaciones en ecosistemas sensibles y carbono neutralidad.....	64
Capítulo 27: Prácticas sostenibles en manejo de suelo y carbono neutralidad.....	65
Capítulo 28: Comunidades costeras y acciones para la carbono neutralidad.....	66
Capítulo 29: Planificación urbana sensible al clima y carbono neutralidad	68
Sección 7: Conclusiones.....	71
Sección 8: Recomendaciones.....	74
Acrónimos y Glosario	78
Referencias	82



Introducción

- La colaboración entre el sector público, el sector privado, la ciudadanía y la academia aportará a que la meta de carbono neutralidad incentive un desarrollo resiliente al clima, que se pueda medir, transparentar, evaluar y que abra el espacio necesario para discusiones en un contexto democrático.
- La mejor comprensión de los fenómenos, la cuantificación de emisiones y capturas, y el desarrollo de indicadores de seguimiento y evaluación son espacios donde se debe seguir trabajando.

Introducción

Desde 2022, Chile cuenta con una Ley Marco de Cambio Climático; además, acaba de entregar su actualización de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) para el periodo 2025-2030, en cumplimiento con el Acuerdo de París. Estas se presentaron en conjunto con una Estrategia de Transición Socio-ecológica Justa (ET SJ). En estos documentos, que rigen la política climática, Chile ha reforzado su compromiso con la **carbono neutralidad** y con una estrategia basada en la justicia climática. Esta política de Estado es revisada de manera crítica e independiente en este informe, identificando desafíos y oportunidades.

Desde el punto de vista de la ciencia del cambio climático, la carbono neutralidad es una meta política que se alinea con las recomendaciones científicas. El aumento de las emisiones de **Gases de Efecto Invernadero (GEI)** que se viene observando desde hace décadas y que resulta en una mayor concentración de estos gases en la atmósfera, explica en gran medida el aumento de la temperatura que tiene efectos en el clima del planeta. Hay consenso científico en que la reducción de emisiones (mitigación del cambio climático) es indispensable para mantener condiciones climáticas seguras para habitar la Tierra. La carbono neutralidad, entendida como el balance entre emisiones y **capturas de carbono** atribuibles a acciones humanas, es una meta importante, pese a que no resuelve por sí sola el problema del cambio climático, que ya es un hecho y para el cual es necesario tomar medidas de adaptación.

La meta de carbono neutralidad es una guía para la **acción climática**, no obstante, deja el espacio para tomar decisiones respecto a las rutas para lograrla, lo que ofrece una oportunidad para el desarrollo resiliente al clima, con justicia y reforzamiento de la democracia.

Chile basa su compromiso en acciones de mitigación que reducirán las emisiones de GEI y también en la gestión de ecosistemas que capturan estos GEI. Estas acciones tienen una base científica, que puede fortalecerse, y necesitan de seguimiento, monitoreo y de un sistema transparente de registro. Las acciones no solo deben ser evaluadas en cuanto aportan a la contabilidad de GEI en la atmósfera, sino también en los impactos que tienen para llegar a esa meta, por ejemplo, en cómo se distribuyen los costos y beneficios de las medidas tomadas. La transparencia y la continua evaluación de la acción climática en sus diferentes etapas (desde mejorar diagnósticos hasta evaluar impactos) son la base para la participación de diversos actores en una **gobernanza climática** democrática.

El presente informe, de carácter interdisciplinario, se enfoca en tres preguntas principales: ¿cuáles son los vínculos entre el ciclo del carbono, el cambio climático y la carbono neutralidad?, ¿cuáles son las acciones climáticas que ha tomado Chile en relación a esta meta y por qué hay incertidumbre asociada? y ¿qué propuestas pueden orientar los procesos de toma de decisiones en esta materia?

A través de este Informe a las Naciones sobre carbono neutralidad, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) espera contribuir con evidencia relevante sobre las implicancias, desafíos y oportunidades de la carbono neutralidad en Chile, y proponer las orientaciones para un desarrollo resiliente al clima (DRC), es decir, un desarrollo con reducción de emisiones y protección de las personas y sus territorios.

El Informe a las Naciones se estructura de la siguiente manera:



La primera sección presenta el contexto de la gobernanza climática internacional, dando a conocer los acuerdos en los que se enmarca la política de carbono neutralidad de Chile.



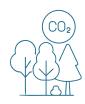
La segunda sección muestra la comprensión que tiene la ciencia sobre el fenómeno biogeoquímico que explica el ciclo del carbono y su vínculo directo con el cambio climático, considerando tanto la escala nacional y global. Esta es la base científica para entender la estrategia de carbono neutralidad.



La tercera sección da cuenta de la gobernanza climática en Chile. Esto incluye los aspectos normativos, los instrumentos de política pública y su evolución, destacando las posibilidades de sinergias entre mitigación y adaptación para potenciar **cobeneficios**.



La cuarta sección aborda los métodos involucrados y la incertidumbre en la evidencia que sustenta la cuantificación y gestión de la carbono neutralidad en Chile y la gobernanza de los datos climáticos.



La quinta sección muestra posibilidades de mejora en la comprensión y cuantificación del carbono con los avances logrados por la comunidad científica. En esta sección no solo se abordan las capturas que son centrales en la estrategia de carbono neutralidad de Chile, sino que además se aborda la relevancia de los **reservorios de carbono** y su cuantificación.



La última sección presenta propuestas para un desarrollo resiliente al clima, considerando las oportunidades de fortalecer la acción climática al configurar paisajes y ciudades más resilientes, a partir de la evidencia científica disponible.

Todas las palabras que aparecen en negrita en el documento, se pueden encontrar en el glosario al final del informe.



Sección 1:

Carbono neutralidad y gobernanza climática global

- La carbono neutralidad es una meta política multilateral de los países Parte del Acuerdo de París, asumida para evitar niveles más peligrosos de calentamiento global.
- El desarrollo resiliente al clima (DRC) es también una meta y representa la opción por alcanzar la carbono neutralidad con base en la justicia climática, pues no basta con medir cuánto disminuyen las emisiones, sino cómo disminuyen y con qué efectos.
- Para lograr la carbono neutralidad y el DRC se necesita una gobernanza climática que pueda garantizar la justicia del proceso y de sus resultados.



Sección 1: Carbono neutralidad y gobernanza climática global

Los gases de efecto invernadero (GEI) se encuentran de manera natural en la atmósfera terrestre y absorben la energía térmica emitida por el sol y por la superficie de la Tierra. Al mismo tiempo, los GEI irradian parte de esta energía hacia el planeta, produciendo lo que se conoce como efecto invernadero, fenómeno que ha generado una temperatura idónea para permitir la evolución de la vida en la Tierra.

Sin embargo, este proceso natural ha sido perturbado por la acción humana, ya que el uso de **combustibles fósiles** y el cambio de uso del suelo debido a las actividades sociales y productivas ha provocado una mayor concentración de GEI en la atmósfera, lo que aumenta la temperatura superficial del planeta. Las emisiones más abundantes son de dióxido de carbono (CO_2), que permanece por decenas de años a siglos en la atmósfera.

Sin importar en qué lugar de la Tierra se emitan GEI de larga vida, habrá efectos en la atmósfera global y, si las emisiones derivadas de las actividades humanas no se contienen, aumentará el cambio climático antropogénico, pudiendo sobrepasar límites de no retorno. Por tanto, para contener este fenómeno global y sus impactos, se requiere de una acción climática igualmente global, rápida y decidida.

El propósito de esta sección es mostrar los acuerdos internacionales en los que se enmarca la política climática internacional para abordar este fenómeno.



Capítulo 1: Gobernanza climática global

Cecilia Ibarra

La gobernanza climática puede entenderse como la manera en que las sociedades definen objetivos y prioridades, deciden, implementan y supervisan acciones de diversa índole para hacerse cargo de las causas y consecuencias del cambio climático. Involucra distintos actores, entre ellos el Estado, la sociedad civil, la academia y el sector privado, y se da a distintos niveles (internacional, nacional y local).



¿Qué es la gobernanza climática?

Esta gobernanza climática ha sido liderada por los representantes de los países que adhieren a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) con el objetivo de lograr acuerdos multilaterales. En este sentido, a través de los años se ha ido conformando una institucionalidad climática a nivel planetario (Figura 1.1), estableciendo las reglas para la gobernanza, donde se definen quiénes participan, en qué instancias y bajo qué normas.

Por ejemplo, en la Conferencia de Medio Ambiente y Desarrollo realizada en Estocolmo en 1972, los gobiernos tomaron conciencia de la necesidad de actuar en conjunto. En la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro en 1992, se logró un tratado en materia climática, esta-

bleciéndose la CMNUCC, adoptada por casi 200 países o “Partes”. Esta Convención establece como su órgano decisivo a la Conferencia de las Partes (COP), que se reúne anualmente para acordar la acción climática y supervisar la aplicación de los objetivos del tratado.

La primera sesión de la COP se realizó en Berlín en 1995, y en 1997 se logró la firma del Protocolo de Kyoto, que entró en vigor en 2005. Este tratado tuvo como objetivo que más de 30 países disminuyeran sus emisiones de GEI y que informaran de sus progresos. En tanto, en la COP de 2015, se logró el Acuerdo de París, que coordina la acción climática global en la actualidad, y donde los países se comprometen a la acción climática según sus mejores capacidades y cada vez de un modo más ambicioso, como se verá en el próximo capítulo.

La gobernanza climática se informa con ciencia, para ello la CMNUCC acuerda la elaboración de informes que apoyen su labor y que se encargan al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Este panel nació en 1988, previo a la CMNUCC y a instancias de la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, y fue refrendado por la Asamblea General de las Naciones Unidas el mismo año. El IPCC tiene la finalidad de reunir y evaluar la evidencia disponible respecto de los temas que permitan asesorar la toma de decisiones respecto de la acción climática multilateral. La evidencia científica se ha recopilado en distintos informes elaborados por el IPCC.

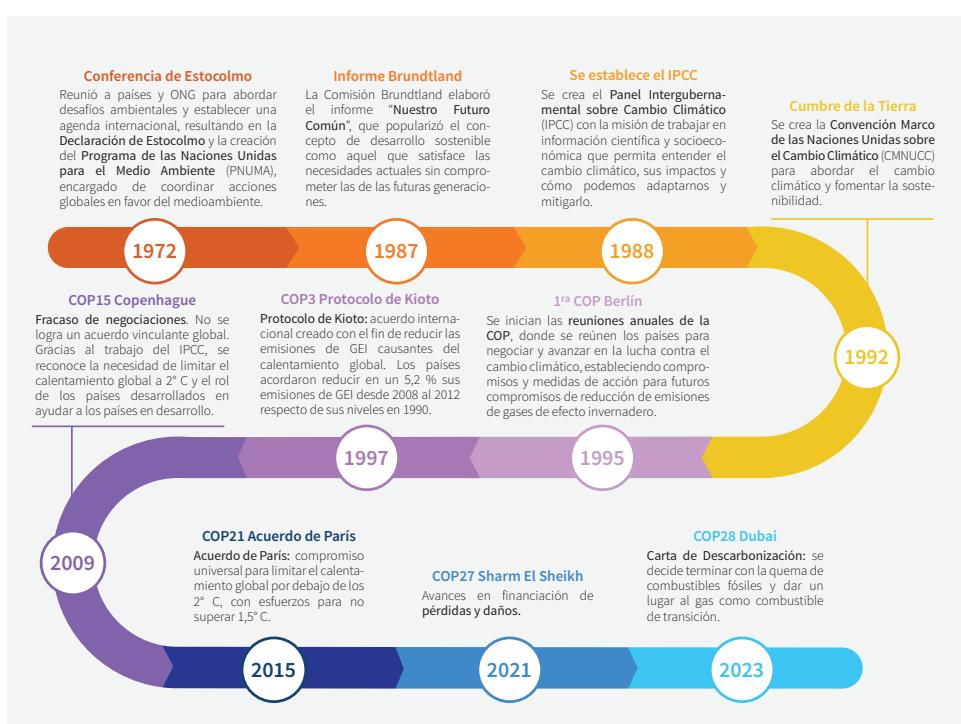


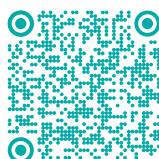
Figura 1.1: Hitos en la gobernanza climática internacional



Capítulo 2: El Acuerdo de París y la carbono neutralidad

Pilar Moraga, Eugenia Gayo y Fabrice Lambert

El actual régimen internacional del cambio climático se rige por el Acuerdo de París, dictado bajo el alero de la CMNUCC. Su objetivo es mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2 °C, y proseguir los esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C respecto de los niveles preindustriales. Para lograrlo, los países o Partes se comprometen a reducir sus emisiones de GEI y a aumentar su captura hasta alcanzar la carbono neutralidad. Este concepto es una meta que busca frenar el calentamiento global e implica alcanzar un punto de equilibrio entre los gases de efecto invernadero emitidos por actividades humanas y los que son capturados por ecosistemas con algún grado de manejo para que no aumente su concentración en la atmósfera.



¿Qué es la carbono neutralidad?

El Acuerdo de París señala que superar estos límites (1,5 °C o 2 °C) implica el aumento de los riesgos de cambios severos, como el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos. Si la suma de las emisiones de todos los países se mantiene por debajo de ese máximo, el calentamiento se contiene. Sin embargo, el Acuerdo de París no asigna cuotas obligatorias por país y cada Estado Parte define sus propios compromisos y las acciones para implementarlos, así como los mecanismos y metodologías para supervisarlos. Dichos compromisos se plasman en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC).

nadas (NDC, por sus siglas en inglés), las que deben ser revisadas cada cinco años, y su avance se reporta y revisa bajo un marco común de transparencia reforzada. El progreso del conjunto de los países se evalúa en un balance global (*Global Stocktake*), que permite informar el seguimiento de los acuerdos. Cada Estado es responsable de actualizar sus NDC, mostrando cada vez mayor ambición en sus metas, y es también responsable de desarrollar las políticas públicas y marcos legales destinados a implementar el Acuerdo a nivel nacional. La evaluación que hace la CMNUCC, a la fecha, muestra que los esfuerzos no son suficientes para lograr las metas acordadas.

Hay distintas opciones para lograr los compromisos climáticos. Como muestra la Figura 2.1, en su Sexto Informe (2021) el IPCC revisó las cinco principales **Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés)**, las cuales corresponden a narrativas de desarrollo que ofrecen un marco para entender cómo tendencias demográficas, económicas, de uso del suelo, tecnológicas y culturales son determinantes en el nivel de emisiones de GEI que se alcanzan, y condicionan la capacidad de mitigar y adaptarse. Estas trayectorias no son predicciones, sino posibles opciones de desarrollo. En otras palabras, los SSP describen el “terreno” y la “pendiente” que cada territorio –desde un país, ciudad o sector– debe remontar para alcanzar la carbono neutralidad. Por su parte, el desarrollo resiliente al clima (DRC) corresponde a los dispositivos a activar (tecnología, gobernanza, financiamiento u ordenamiento del territorio) para que la mitigación, la adaptación y la resiliencia avancen juntas y de forma justa (Figura 2.1).

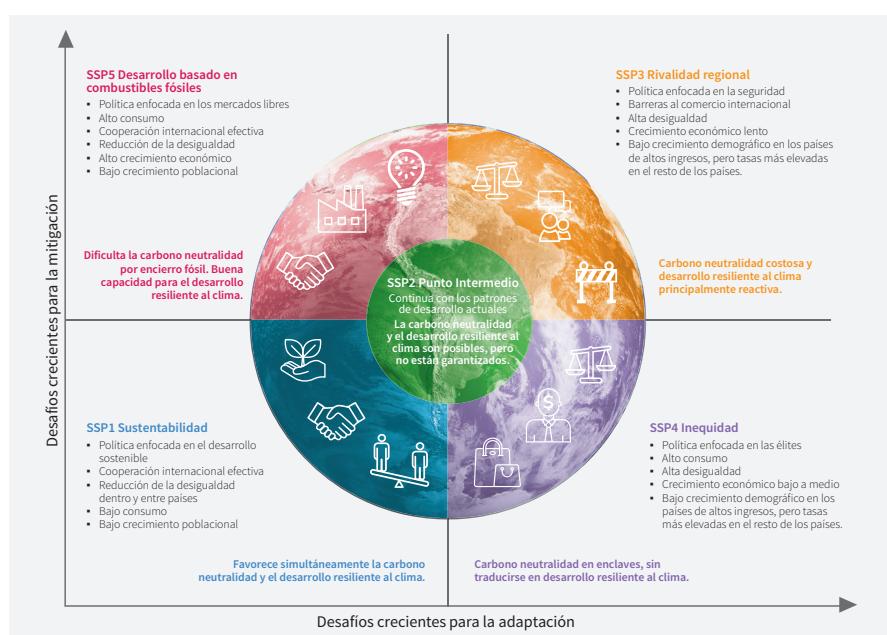


Figura 2.1: Posicionamiento de las SSP en mitigación y adaptación considerando sus efectos sobre carbono neutralidad y desarrollo resiliente al clima (adaptado de O'Neill et al., 2014).



Capítulo 3: Desarrollo resiliente al clima, justicia climática y carbono neutralidad

Eugenio Gayo, Dominique Hervé, María Christina Fragkou y Gabriela Guevara

Dado que cada Estado Parte define sus NDC y las medidas que tomará para lograrlas, puede diseñar y valorar múltiples trayectorias alternativas. Este informe plantea que la carbono neutralidad requiere elegir trayectorias que no profundicen desigualdades ni vulnerabilidades, y que amplíen las oportunidades y el bienestar tanto de la ciudadanía como de los ecosistemas. En ese contexto, el desarrollo resiliente al clima (DRC) aparece como una vía que coordina mitigación y adaptación para reducir emisiones mientras protege a las personas y sus territorios (Schipper et al., 2022).

En el marco del Acuerdo de París, la carbono neutralidad y el DRC son metas interdependientes: limitar el calentamiento exige mitigación sostenida (reducción de emisiones de GEI), mientras que el objetivo global de adaptación requiere fortalecer capacidades y reducir vulnerabilidades.

El DRC es un marco ordenador que alinea la carbono neutralidad con decisiones de planificación, inversión, regulación, compras públicas, innovación y educación. Pone en el centro la reducción de vulnerabilidades y el mejoramiento del bienestar humano y ecológico, con énfasis en equidad, justicia y logro de cobeneficios. A diferencia de enfoques centrados solo en variables técnicas o sectoriales, el DRC aborda dimensiones estructurales, como pobreza, desigualdad, exclusión y degradación ambiental, al reconocerlas como causas y amplificadores del riesgo climático. Este riesgo corresponde a las potenciales consecuencias adversas del cambio climático para las personas y los ecosistemas. En la práctica, el DRC alinea la car-

bono neutralidad a rutas de implementación con hitos, plazos y responsables; exige coherencia entre normas, presupuestos, infraestructura y capacidades; prioriza inversiones que reducen vulnerabilidades y generen valor local; y asegura continuidad más allá de ciclos políticos mediante seguimiento, evaluación y mejora continua. Así, el DRC estructura la implementación de la acción climática en los territorios, los mercados y las instituciones para que la carbono neutralidad sea viable, justa y duradera. No se trata solo de cuánto carbono se reduce, sino de cómo, para quién y con qué efectos.

La coherencia de los flujos financieros con trayectorias de bajas emisiones y DRC vincula ambas agendas. Bajo el principio de equidad y de las responsabilidades comunes, pero diferenciadas, la gobernanza internacional debe distribuir esfuerzos y apoyos financieros, tecnológicos y de fortalecimiento de capacidades, al mismo tiempo que establecer reglas de transparencia para lograr el balance global carbono neutral. Estos mecanismos incorporados por el Acuerdo de París reflejan un enfoque de justicia climática que integra conceptos como “transición justa” o “pérdidas y daños”, los cuales se han instalado en el centro de la discusión climática (Stevens, 2021).

Para lograr la carbono neutralidad y el DRC se necesita una gobernanza climática que pueda garantizar la justicia del proceso y de sus resultados. A nivel internacional hay un alto nivel de consenso en definir la justicia a partir de dimensiones que se interconectan y que permiten evaluar su presencia (Tabla 1).

Tabla 1: Dimensiones de la justicia climática

Dimensiones de la justicia	Descripción asociada a la justicia climática
Distributiva	Distribución equitativa de los costos y beneficios de las acciones climáticas.
Procedimental	Las personas involucradas en la acción climática o sus efectos participan en los procesos de toma de decisiones.
De reconocimiento	Se reconoce y se incluye a distintos grupos, removiendo las barreras económicas, culturales o políticas que pudieran inhibir su participación.
Restaurativa	Se repara el daño provocado por el cambio climático y por las acciones climáticas.
Intergeneracional	Las decisiones sobre acciones climáticas que se adopten en el presente consideran los derechos y necesidades de las generaciones futuras, asegurando que estas no sean privadas de un ambiente sano y resiliente.



Las dimensiones incluidas en la mayoría de las definiciones de justicia son la distributiva y la procedural (Rawls, 1971; Schlosberg, 2007). Hay definiciones que incluyen además las dimensiones de reconocimiento, reparación e intergeneracional, que tienen especial relevancia en el debate sobre justicia climática (Guevara, 2025).

Recuadro 1

El enfoque *fair share* para incorporar la acción climática justa en las políticas de carbono neutralidad. (Catalina Cortés)

El concepto *fair share* (o distribución justa) tiene por objetivo responder: ¿quién debe hacer más -y por qué- para enfrentar la crisis climática? Esto desde el punto de vista de cómo repartirse entre los distintos países el “presupuesto remanente de carbono”; es decir, el límite máximo de emisiones que aún puede generarse sin comprometer las metas establecidas en el Acuerdo de París.

En lugar de asumir simplemente que todos deben contribuir por igual, este enfoque introduce cuestiones ligadas a las distintas capacidades para desarrollar medidas de mitigación, las legítimas expectativas de desarrollo y las diferencias en responsabilidad histórica en la crisis climática (emisiones de GEI acumuladas en el tiempo), alineándose así, con el principio de “responsabilidad común, pero diferenciada y capacidades respectivas” reconocido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y el IPCC, entre otros.

Esto abre tanto preguntas éticas -¿qué principios concretos debiesen emplearse para hacer esta repartición, y quién debe definirlos?- como desafíos técnicos: ¿cómo traducir estos principios en indicadores operativos e incorporarlos en los modelos y herramientas prospectivas para la planificación climática?



Capítulo 4: Carbono neutralidad e inventarios

Cecilia Ibarra y Fabrice Lambert

Para verificar el cumplimiento de los compromisos internacionales que permitan lograr la carbono neutralidad, los países Parte de la COP deben elaborar y presentar sus Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). Estos inventarios se ciñen a las directrices metodológicas del IPCC, que supervisa su confección y que se ajustan según el nivel de información que posean los países, pudiendo realizarse inventarios más o menos avanzados. El IPCC ha desarrollado metodologías que dan una base científica y técnica a las mediciones, y que son sugeridas a los países para llevar sus inventarios. Cabe señalar que los INGEI registran los **flujos** de GEI incluidos en los acuerdos internacionales; por tanto, no contienen todos los flujos del ciclo del carbono de los distintos ecosistemas de un país y no contabilizan todos los reservorios de carbono.

A partir del Acuerdo de París, muchos países, incluyendo a Chile, además de registrar sus GEI, han integrado en los inventarios a los **forzantes climáticos de vida corta (FCVC)**. El IPCC inició la elaboración de su séptimo informe de evaluación, para el que se acordaron contenidos que incluyen el desarrollo de estándares metodológicos para estos forzantes climáticos, como carbono negro, metano, aerosoles y sus precursores.

La contabilización que se mantiene en los INGEI corresponde a las emisiones y capturas dentro de un país, y las metodologías para llevar esta contabilidad se van afinando y se revisan para dar cuenta del consenso científico actualizado. Es por ello que se ha decidido, por ejemplo, incluir los FCVC, y que –atendiendo a la evidencia científica- se debiera incluir a los océanos y los bosques de macroalgas, y también estandarizar metodologías en las que pueden haber diferencias entre países, como es el caso del suelo, según se muestra más adelante.



Capítulo 5: Contabilidad de océanos y carbono azul

Laura Fariás, Rocío Araya, Laura Ramajo y
Martín Jacques-Coper

El océano es un regulador climático fundamental ya que absorbe más del 90 % del exceso de calor del planeta, captura cerca del 25 % del CO₂ antropogénico y sostiene la seguridad alimentaria para más de tres mil millones de personas (IPCC, 2019). Pese a su importancia y avances recientes en el marco de las Conferencias de la ONU sobre los Océanos (UNOC, por sus siglas en inglés), los océanos permanecen desconectados de las políticas climáticas globales (Gattuso et al., 2025).

A nivel internacional, los INGEI y las NDC de cada uno de los países que tributan al CMNUCC no consideran los territorios oceánicos, especialmente las zonas costeras, como parte del balance país (Howard et al., 2017). Esto responde, en parte, a vacíos metodológicos, a la debilidad en la gobernanza del océano y a la persistente separación entre el sistema climático y los sistemas marinos en los marcos contables globales (IPCC, 2019; Hoegh-Guldberg et al., 2019).

No obstante lo anterior, en los últimos años los ecosistemas de carbono azul (marismas, manglares y praderas marinas) han cobrado un papel cada vez más importante en las estrategias climáticas de los países Parte de la COP. Actualmente, son los únicos ecosistemas marinos que cuentan con metodologías acordadas por el IPCC para medir su contribución en los compromisos de reducción de emisiones. Otros ecosistemas, como los bosques de macroalgas y sedimentos marinos, aún se encuentran en fase de investigación. Hasta ahora, 28 países han incluido referencias explícitas a los ecosistemas de carbono azul como parte de sus compromisos de mitigación en sus NDC y 58 países los han incorporado en sus estrategias de adaptación al cambio climático. Su conservación también ha sido destacada como clave para avanzar en el DRC.

El término **carbono azul** se define como el carbono capturado y almacenado por los ecosistemas costeros y marinos como **humedales, manglares, marismas** y pastos marinos (Nellemann et al., 2009; Mcleod et al., 2011). Estos ecosistemas absorben CO₂ desde la atmósfera mediante la fotosíntesis y lo asimilan a su biomasa (reservorio de carbono). Posteriormente, este carbono puede quedar secuestrado y enterrado en los sedimentos adyacentes. En este proceso, el carbono permanece aislado de otros componentes del sistema climático (principalmente la atmósfera) durante siglos o milenios, siendo fundamental en la mitigación del cambio climático (Howard et al., 2023).

Capítulo 6: Cuantificación de carbono en el suelo

Claudia Rojas y Mauricio Galleguillos

En relación con el sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS), se exige reportar el cambio en las reservas de carbono del suelo, junto con la biomasa aérea y subterránea, madera muerta y hojarasca.

Pese a su importancia, la cuantificación del carbono en el suelo resulta limitada en los inventarios nacionales debido a que se hacen supuestos fuertes y simplificaciones en los procesos de intercambio de materia y energía. El INGEI supone que, cuando los usos de la tierra no cambian, el depósito de carbono en los suelos se encuentra en equilibrio y, por lo tanto, no varía como resultado de la gestión. En consecuencia, no se reportan cambios anuales en este reservorio bajo un mismo uso de la tierra, solo se estiman variaciones cuando ocurre una conversión de coberturas, por ejemplo, la transformación hacia tierras forestales o la pérdida de estas, aplicando metodologías estandarizadas propuestas por el IPCC (2006). Sin embargo, se ha demostrado que el suelo es un enorme emisor de carbono (Hayes & Clapp, 2001; Tang et al., 2022; Friedlingstein et al., 2025), pero que, bajo ciertas prácticas de gestión, características del clima y de la zona, pueden favorecer mayores capturas (Laganière & Anngers, 2009; Reed et al., 2021).

De este modo, al no cuantificar adecuadamente las dinámicas de los flujos de este reservorio podría aumentar o disminuir el presupuesto de carbono nacional y podría presentar una variación significativa producto del clima cambiante (Wiesmeier et al., 2019).

Además, aunque el reporte del carbono del suelo es obligatorio, la implementación de metodologías para estimarlo varía entre países. Algunos países adoptan mecanismos avanzados (modelado, distinción entre tierras gestionadas y no gestionadas), mientras que otros, simplemente, reportan con menor detalle, regularidad y con metodologías más simplificadas o inconsistentes (Grassi et al., 2022; Dittmer et al., 2023). Por ello, contar con cuantificaciones sólidas y consistentes del carbono en el suelo resulta crucial para mejorar la exactitud de los inventarios nacionales y asegurar decisiones de política climática basadas en información confiable.



Capítulo 7: La gobernanza de los datos climáticos

Francisca Muñoz

Cada país Parte necesita información para sus políticas en materia climática, en particular aquellas que permitan decidir respecto de las acciones climáticas para lograr la carbono neutralidad y verificar su logro, no solo en términos de emisiones y capturas de GEI, sino también de sus impactos. Los datos pueden incluir observaciones físicas del sistema terrestre, como la temperatura, la precipitación, los eventos extremos y también datos de naturaleza socioeconómica y medioambiental (incendios forestales, productividad primaria, etc.) que permitan evaluar los impactos del cambio climático y de las acciones climáticas en las comunidades, la economía y los ecosistemas.

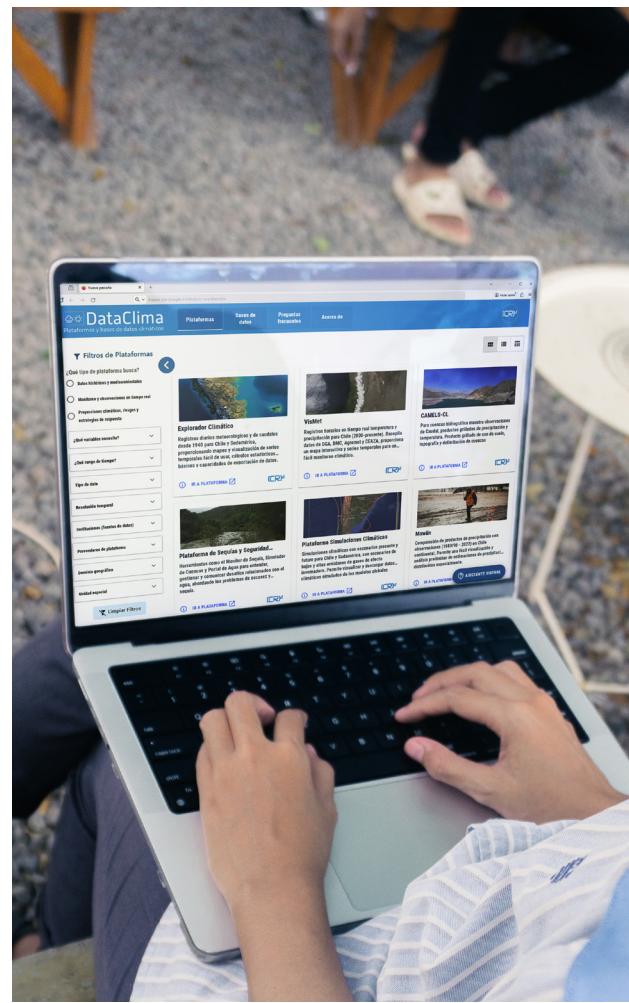
Dada la necesidad de información, aparece el concepto de gobernanza de datos climáticos como un factor clave para la toma de decisiones en favor de la carbono neutralidad y el desarrollo resiliente al clima. La gobernanza de los datos climáticos se orienta a regular la generación, el procesamiento y el uso de datos climáticos, con un enfoque en la acción climática efectiva. Integra aspectos legales e institucionales, establece responsabilidades claras, y define estándares y protocolos orientados a la interoperabilidad, accesibilidad, participación multiactor, alineación internacional, mecanismos de verificación y desarrollo de capacidades. Asimismo, contempla los roles, interacciones y responsabilidades entre los actores involucrados para garantizar que los datos climáticos sean precisos, accesibles, trazables y utilizados de manera ética y equitativa.

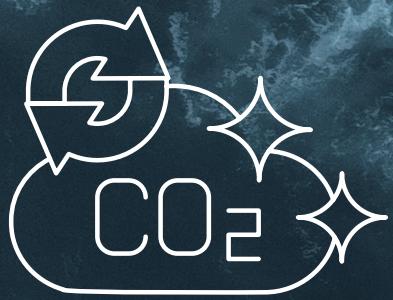
En el Acuerdo de París y su Marco Reforzado de Transparencia, se reconoce la necesidad de contar con información climática consistente y comparable, impulsando el desarrollo de marcos de gobernanza de datos que permitan avanzar en acciones climáticas efectivas, transparentes y basadas en evidencia. El acceso a información precisa, trazable y comparable sustenta no solo la elaboración de los inventarios nacionales y la evaluación del progreso colectivo global (e.g. *Global Stocktake*) hacia los objetivos del Acuerdo de París, sino también permite la integración y armonización de políticas sectoriales, sociales y territoriales en torno a objetivos compartidos (Vaidula & Hood, 2018; Ibarra & Orellana, 2025; BID, 2024).

Este modelo de gobernanza responde a múltiples desafíos como la fragmentación institucional, la diversidad de escalas y metodologías, las barreras legales al intercambio de información, y los riesgos de concentración y privatización de datos. En este contexto, se propone avanzar hacia infraestructuras digitales interoperables, abiertas y descentralizadas, concebidas como bienes comunes digitales que faciliten una participación equitativa de gobiernos, instituciones científicas, comunidades y sociedad civil (Schlitz et al., 2022; Mai & Elsässer, 2022; PARIS21, 2022; Open North, 2023; Muñoz, 2025).

Este enfoque fortalece la confianza internacional, refuerza los sistemas de Medición, Reporte y Verificación, y asegura que los compromisos climáticos, como la carbono neutralidad, sean monitoreables de manera abierta y verificable. Además, permite integrar de manera amplia variables físicas, socioeconómicas y ecológicas en la toma de decisiones. Iniciativas internacionales como la *Open Up Guide for Climate Action* de *Open Data Charter*, *Climate Action Data Trust* y *Open Government Partnership* ofrecen rutas concretas para avanzar en esta dirección, promoviendo la estandarización técnica, la verificación multiactor y la colaboración multisectorial (Grinspan y Worker, 2021; OGP, 2024).

Finalmente, consolidar prácticas como la infraestructura digital integrada, transparencia, trazabilidad y metadatos comparables no solo implica desafíos técnicos, sino que constituye una condición fundamental para transitar efectivamente hacia la carbono neutralidad global (Engvall & Flak, 2022; Verhulst, 2024).





Sección 2:

Carbono neutralidad y ciclo del carbono

- El ciclo del carbono es natural y fundamental para el funcionamiento de la biosfera y del sistema climático en general. Este opera en distintas escalas temporales, desde geológicas (millones de años) a humanas (años o siglos), y se mantiene en equilibrio.
- Este equilibrio se ha alterado debido a las actividades humanas que liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera, principalmente, en forma de dióxido de carbono (CO₂).
- El manejo sostenible de los ecosistemas, que actúan como reservorios de carbono, es esencial para volver a equilibrar este ciclo y avanzar hacia la carbono neutralidad.



Sección 2: Carbono neutralidad y ciclo del carbono

Lograr un balance entre lo que se emite y lo que se captura requiere comprender cómo circula el carbono entre la atmósfera, los océanos, los suelos y los ecosistemas, y por qué ese ciclo está íntimamente ligado al cambio climático. Esta sección ofrece una mirada general del funcionamiento del ciclo del carbono a escala global, de su manifestación en Chile y de su relación con el cambio climático.



Capítulo 8: El ciclo global del carbono

Juan Pablo Boisier, Laura Farías y Mauricio Galleguillos

El carbono es un elemento químico esencial para la vida en la Tierra. El ciclo del carbono (Figura 8.1) describe el flujo entre distintos reservorios de este elemento en el sistema terrestre —atmósfera, biosfera, océanos y litósfera— que lo contienen en diversas formas (compuestos orgánicos e inorgánicos). Este intercambio está regulado por procesos geológicos, biológicos y fisicoquímicos. Aunque minoritario en volumen, el reservorio de carbono en la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO_2) y

metano (CH_4) desempeña un papel central, ya que son gases de efecto invernadero (GEI) cuya abundancia determina en gran medida que nuestro planeta sea habitable para humanos y otros seres vivos. Sin embargo, desde la Revolución Industrial la concentración de GEI ha aumentado de manera tan acelerada que hoy es responsable del calentamiento excesivo de la atmósfera, lo que nos ha llevado a la presente crisis climática global (IPCC, 2021).

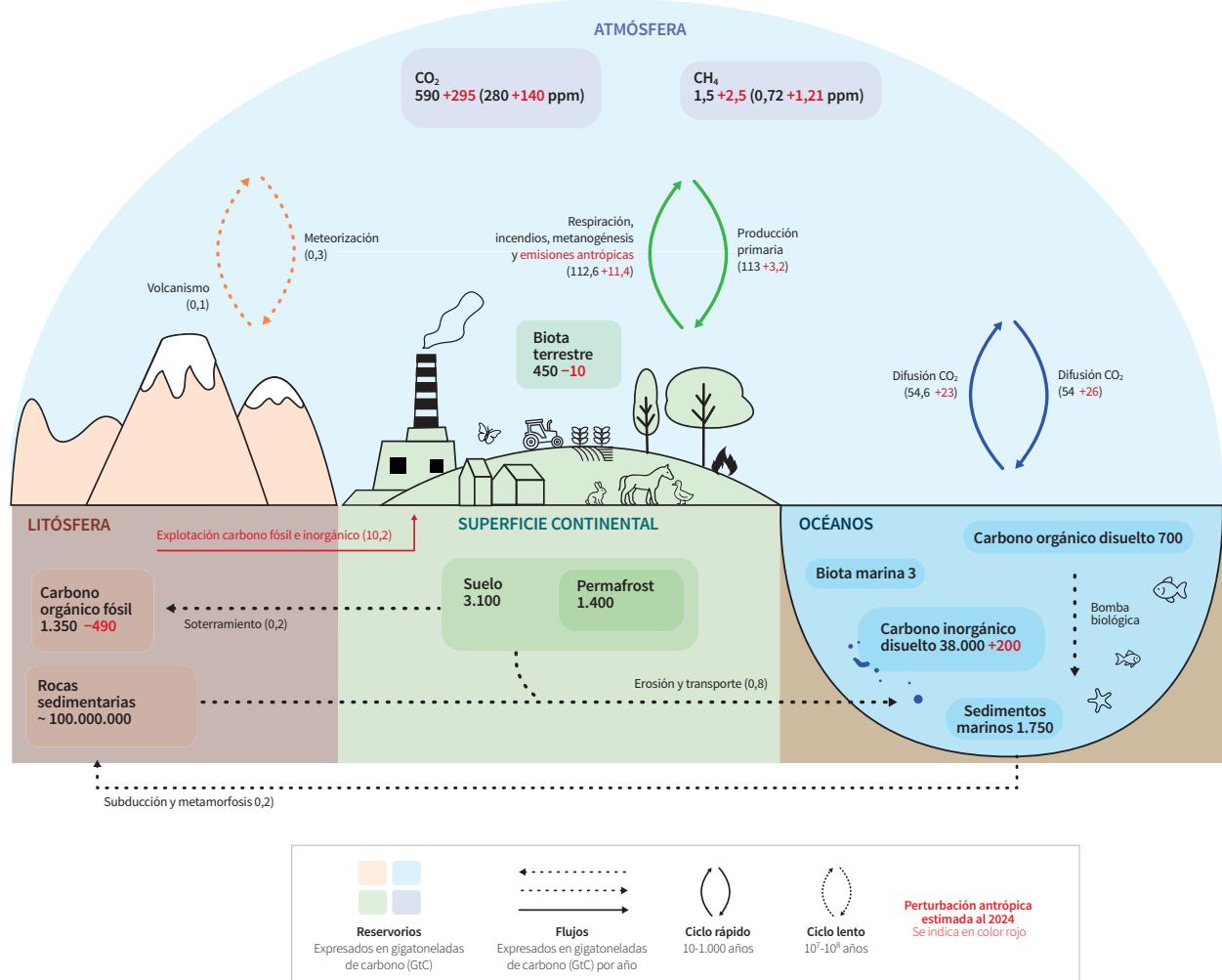


Figura 8.1: Ciclo global del carbono. Reservorios y flujos medios de carbono para el periodo preindustrial (1750), representados a través de cuatro componentes del sistema terrestre: litósfera, superficie continental, océanos y atmósfera. Las unidades para reservorios se expresan en gigatoneladas de carbono (GtC), equivalentes a mil millones de toneladas o 10^{12} kg de carbono, y en GtC por año para flujos. El contenido de carbono en la atmósfera (también en GtC) se indica junto con las concentraciones equivalentes de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), expresadas en partes por millón en volumen (ppm). En color rojo se indican cambios en reservorio y flujos, estimados para el año 2024. Notar que el cambio neto en el contenido de carbono de la biota terrestre resulta de pérdidas asociadas al cambio de uso de suelo (aproximadamente 255 GtC) y de aumentos en su biomasa por una mayor captura de carbono (cerca de 245 GtC). Fuente: Elaboración propia con datos de Lee et al. (2019), Canadell et al. (2021), CenCO2PIP (2023), Friedlingstein et al. (2025).



Recuadro 2

Carbono orgánico del suelo

(*Claudia Rojas y Mauricio Galleguillos*)

Los suelos son el principal reservorio de carbono orgánico y constituyen el tercer mayor reservorio de carbono en la Tierra (si consideramos el aporte del permafrost), después de los océanos y de la litósfera. El carbono en el suelo puede encontrarse en forma de carbono orgánico de suelo (COS) y de carbono inorgánico de suelo (CIS). Las estimaciones globales sobre el almacenamiento de carbono en los suelos varían según la profundidad considerada y los enfoques metodológicos; sin embargo, todas estas aproximaciones evidencian la importancia de los suelos como principal reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres.

Las reservas de COS están estrechamente relacionadas con las comunidades microbianas, que desempeñan un papel central en la descomposición de la materia orgánica y en el ciclo del carbono (Naylor et al., 2020). El almacenamiento de COS es principalmente el resultado del balance neto entre los aportes de origen vegetal —derivados de la fotosíntesis— y las pérdidas por la respiración de los organismos presentes en el suelo y la consiguiente liberación de CO₂ a la atmósfera (Paul, 2015). Esta respiración se debe principalmente a organismos que no producen su propio alimento, que desprenden CO₂ durante la descomposición de la materia orgánica del suelo; sin embargo, también se libera CO₂ por el metabolismo de organismos que sí producen su propio alimento, como las plantas. En cuanto a la descomposición de la materia orgánica del suelo, compuesta entre un 40 y un 60 % de carbono orgánico, esta puede tardar de días a décadas, lo que determina la persistencia de la materia orgánica del suelo (Cotrufo & Lalvée, 2022). La capacidad de los suelos para funcionar como **sumideros de carbono** se ve amenazada por perturbaciones asociadas al cambio climático y otras presiones, como los cambios en el uso del suelo e incendios, y dicha capacidad ha resultado difícil de anticipar bajo escenarios futuros proyectados (Jansson & Hofmockel, 2020).

Aunque los procesos que regulan el ciclo del carbono están activos constantemente, en el intercambio de carbono entre distintos reservorios del sistema terrestre se distinguen escalas de tiempo relativamente cortas (de años a siglos: ciclo rápido de carbono) y largas (millones de años: ciclo lento de carbono). El ciclo rápido de carbono no se basa en flujos intensos de CO₂ y CH₄ entre la atmósfera y las superficies continentales y oceánicas (Figura 8.1). Estos flujos están controlados por procesos como la fotosíntesis y la síntesis de materia orgánica al inicio de la cadena trófica (procesos de **captura de carbono**), así como por la respiración de plantas, descomposición de materia orgánica en el suelo y la quema natural de biomasa (procesos de emisión de carbono). A su vez, estos procesos determinan los reservorios de carbono orgánico continental, con grandes volúmenes almacenados en el suelo y en el **permafrost** (ver Recuadro 2). El intercambio por difusión de CO₂ entre la atmósfera y los océanos, y la actividad fotosintética de la biota marina, constituyen otro componente esencial del ciclo rápido del carbono, modulado por factores como la temperatura, la salinidad y la circulación oceánica.

Por otro lado, el ciclo lento del carbono se refiere al intercambio de este elemento entre la litósfera —su reservorio principal— y otros componentes del sistema terrestre (flechas segmentadas en la Figura 8.1). El soterramiento de carbono orgánico que dio origen a las reservas de combustibles fósiles, la lenta deposición de sedimentos en el lecho marino y la formación de rocas carbonatadas, las emisiones de CO₂ mediante el volcanismo, o su captura mediante reacciones químicas de rocas expuestas en la superficie a condiciones ambientales (meteorización), forman parte de este ciclo. Aunque los flujos involucrados son inmensamente menores que los del ciclo rápido, el ciclo lento del carbono cumple un papel fundamental en la regulación del clima a escala geológica; a lo largo de miles de millones de años, este ciclo ha contribuido a mantener la temperatura y otras variables dentro de rangos que han permitido el desarrollo y la permanencia de la vida en la Tierra (Walker et al., 1981).

El ciclo del carbono tiende a converger hacia estados cercanos al equilibrio a lo largo de grandes ciclos paleoclimáticos. Este equilibrio implica que, en promedio sobre varios años, los flujos de entrada y salida de carbono en componentes del sistema terrestre —como la atmósfera— se compensan y generan un balance neto cercano a cero, manteniendo constantes los reservorios. El contenido de CO₂ en la atmósfera constituye un buen indicador de estos estados, en los que los períodos cálidos coinciden con una mayor abundancia de este gas.

La condición preindustrial del ciclo de carbono, caracterizada en parte por una abundancia atmosférica de CO₂ cercana a 280 partes por millón (ppm), se mantuvo relativamente estable durante aproximadamente 11 mil años (Canadell et al., 2021).



Esta historia “reciente” del sistema terrestre permite dimensionar la magnitud de la perturbación del ciclo del carbono provocada por las actividades antrópicas, que en sólo décadas han impulsado un aumento en la concentración atmosférica de CO₂ a cerca de 425 ppm (medición para agosto 2025, <https://gml.noaa.gov/>). Los niveles actuales de CO₂ son los mayores registrados en los últimos dos millones de años, y la última vez que hubo concentraciones de CO₂ sustancialmente mayores —cerca a 500 ppm— fue en la época del Mioceno medio, hace unos 15 millones de años, cuando las temperaturas eran entre 3 y 4 °C superiores a las actuales (CenCO2PIP, 2023).

Como se verá en el siguiente capítulo, la quema de combustibles fósiles y otras actividades humanas están rompiendo el equilibrio del ciclo del carbono y del sistema terrestre. Esto no solo provoca un aumento de la temperatura del planeta, sino que también afecta otros componentes del ciclo rápido de carbono y otros procesos más difíciles de medir, que podrían tener impactos aún mayores.



Capítulo 9: La relación del ciclo del carbono con el cambio climático que vivimos

Juan Pablo Boisier

El ciclo del carbono forma parte del sistema terrestre o sistema climático, una red compleja de interacciones regulada por procesos físicos, químicos y biológicos. Como se señaló en el capítulo anterior, el cambio climático antrópico surge de una alteración del ciclo del carbono (reservorios y flujos marcados en rojo en la Figura 8.1) que, por su rapidez, no tiene precedentes en la historia de la humanidad ni en la del planeta. No obstante, la magnitud de este cambio está modulada por las múltiples interacciones propias del sistema climático.

Existen múltiples formas de representar conceptualmente el sistema terrestre (véase, por ejemplo, Steffen et al., 2020). En la Figura 9.1 se describe a través de tres componentes: el primero corresponde a los reservorios de carbono distintos de la atmósfera; el segundo a la composición química de la atmósfera; y el tercero agrupa las variables físicas con las que solemos caracterizar el clima, como la temperatura. Un cuarto componente abarca las actividades humanas y su interacción con el sistema.

Las actividades humanas han movilizado carbono desde distintos reservorios (tabla 2), primero mediante la deforestación, la combustión de leña y las emisiones asociadas de CO₂ (explotación de carbono orgánico terrestre), y de manera más intensa en el último siglo a través de la producción de cemento (emisión de carbono inorgánico durante el proceso de calcinación de rocas carbonatadas) y, sobre todo, mediante la explotación de los reservorios de carbono fósil (carbón mineral, petróleo y gas natural). Actualmente, la quema de estos combustibles fósiles es responsable de cerca del 85 % de las emisiones globales de GEI, que, en 2024, se estima que alcanzaron un valor equivalente a 11.000 millones de toneladas de carbono, equivalentes a 11 gigatoneladas de carbono (GtC) (Friedlingstein et al., 2025). Asimismo, las emisiones de GEI acumuladas desde 1750 suman aproximadamente 750 GtC. Estas acciones han alterado el balance preindustrial del ciclo del carbono (Figura 8.1), elevando el contenido de CO₂ en la atmósfera de 280 ppm a más de 425 ppm en 2025 (cerca de un 50 % más) y el de CH₄, que aumentó de 720 partes por billón (ppb) a cerca de 1930 ppb (168 %).

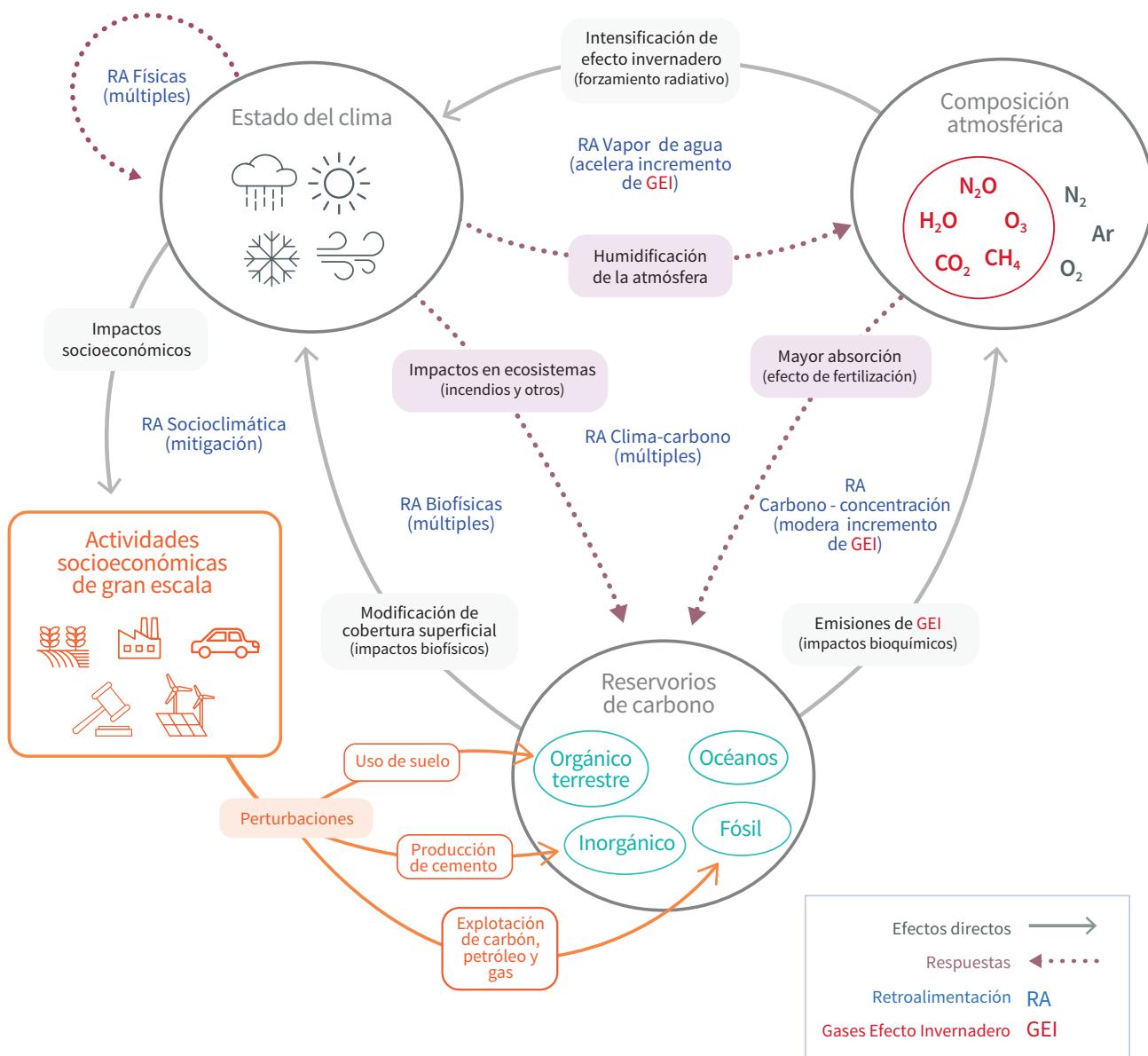


Figura 9.1: Perturbaciones en el ciclo del carbono y en el sistema terrestre causadas por actividades socioeconómicas de gran escala (caja naranja). Las flechas indican interacciones –efectos y respuestas (estas últimas en líneas punteadas)– en y entre distintos componentes del sistema terrestre (círculos grises). Estos componentes representan tres dimensiones del sistema terrestre: los reservorios no atmosféricos de carbono; la composición química de la atmósfera, en la que destacan los gases de efecto invernadero (GEI, en rojo); y el estado de las variables físicas del clima. Ciclos cerrados por un par efecto-respuesta, o por varias combinaciones de estos, originan mecanismos de retroalimentación (RA, en azul), que pueden exacerbar (RA positiva) o atenuar (RA negativa) un impacto inicial. Fuente: Elaboración propia.



Tabla 2. Emisiones globales de GEI estimadas para el presente (2023–2024) y acumuladas desde 1750. Los valores se expresan en miles de millones de toneladas de carbono (GtC) para distintas fuentes y como porcentajes del total. Fuentes: Wu et al. (2024), Friedlingstein et al. (2025)

Fuente (reservorio)	Proceso	Emisiones actuales (GtC/año)	Emisiones acumuladas (GtC)
Biósfera terrestre	Uso de suelo/deforestación	1.1 (9.5 %)	255 (34 %)
Carbono orgánico fósil (litosfera)	Combustión (industria, producción de energía y transporte)	9.9 (86 %)	490 (65 %)
Carbono inorgánico (litosfera)	Producción de cemento (calcinación de caliza)	0.5 (4.5 %)	12.5 (1.5 %)
Total		11.5	758

Cabe señalar que, además de los GEI, las actividades humanas generan forzantes climáticos de vida corta con efectos tanto en el clima como en la salud de la población. Entre estos destacan compuestos que contienen carbono, como aerosoles (orgánicos, carbono negro, etc.), compuestos orgánicos volátiles e hidrofluorocarbonos (Szopa et al., 2021).

Las emisiones antrópicas de GEI han desencadenado múltiples respuestas en el sistema climático que, entre otros efectos, han provocado un aumento de la temperatura media global en cerca de 1,5 °C respecto de la condición preindustrial, debido a una intensificación del efecto invernadero terrestre (Eyring et al., 2021; Forster et al., 2025). Algunas de estas respuestas son especialmente relevantes por su capacidad de amplificar o moderar la perturbación o forzante inicial, lo que se conoce como retroalimentación positiva y negativa, respectivamente (indicadas en azul en la Figura 9.1; notar que el signo de una retroalimentación no califica un impacto como bueno o malo, sino que especifica si esta amplifica o atenúa un efecto inicial). El aumento de CO₂ en la atmósfera ha estimulado una mayor captura de este gas por parte de los ecosistemas terrestres y marinos, reduciendo su acumulación en la atmósfera en alrededor de un 50 % y, a su vez, moderando la respuesta climática (Friedlingstein et al., 2025). Este mecanismo constituye, por tanto, una retroalimentación negativa muy eficiente, siendo uno de los servicios ecosistémicos más relevantes en el contexto del cambio global.

Sin embargo, los impactos regionales del cambio climático en ecosistemas –que, a su vez, regulan el ciclo del carbono– dan lugar a retroalimentaciones que pueden ir en el sentido contrario y acelerar el efecto global de las actividades humanas. Entre estas destacan aquellas asociadas a la degradación de grandes reservorios naturales de carbono, como los bosques tropicales o el permafrost (Canadell et al., 2021). En este contexto, las alteraciones en el funcionamiento de bosques y **turberas** en Chile –derivadas, por ejemplo, de un mayor estrés hídrico, de actividades humanas o de la creciente frecuencia de incendios– podrían comprometer su capacidad de captura de carbono, con repercusiones en los balances nacionales y en los compromisos proyectados en esta materia hacia el futuro (ver capítulo 10).

Otras respuestas del sistema climático, como la humidificación de la atmósfera a medida que aumenta la temperatura, también tienden a amplificar la perturbación inicial mediante retroalimentaciones positivas. Dado que el vapor de agua es un potente GEI, este mecanismo refuerza el impacto asociado al incremento de los niveles de CO₂ y CH₄. Asimismo, la reducción de la criósfera —superficies cubiertas de nieve, extensión del hielo marino y glaciares— y la consecuente disminución de su capacidad de reflejar la radiación solar también exacerbar la perturbación inicial, al aumentar la absorción de radiación y elevar aún más las temperaturas (Forster et al., 2021).

La respuesta del sistema político global al cambio climático, en particular las acciones destinadas a mitigar las emisiones de GEI, busca reducir el impacto inicial. Formalmente, en el marco general ilustrado en la Figura 9.1, la acción climática actúa en sentido contrario a la perturbación, disminuyendo las emisiones frente a un escenario de inacción. Como se discute en la sección 1 de este informe, los acuerdos internacionales apuntan en la dirección correcta, pero la magnitud de esta respuesta aún es limitada y su evolución futura permanece abierta entre varios escenarios posibles.



Capítulo 10:

Balance de carbono en Chile: reservorios y flujos en ecosistemas terrestres de Chile

Mauricio Galleguillos, Rocío Urrutia-Jalabert, Daniel Núñez, Jorge Herrera y Jorge Pérez-Quezada

Chile alberga una gran diversidad de ecosistemas que siguen los mismos procesos biofísicos y bioquímicos que rigen el ciclo de carbono global. Ecosistemas terrestres, como bosques templados, turberas, humedales y praderas, han sido documentados como importantes reservorios de carbono. Por ejemplo, los bosques templados del sur de Sudamérica se encuentran entre los que tienen mayor carbono almacenado del mundo (Pérez-Quezada et al., 2015; Urrutia-Jalabert et al., 2015). Por ejemplo, los bosques de aerce, a pesar de crecer muy lento, están entre los ecosistemas con mayor stock de carbono del planeta, con más de 500 megagramos o toneladas de carbono por hectárea ($Mg C ha^{-1}$) (González et al., 2022). A su vez, las turberas patagónicas también concentran una alta cantidad de carbono, tanto en la parte aérea como en la subterránea, y se encuentran entre los mayores reservorios de carbono orgánico del planeta (Pérez-Quezada et al., 2023). En la Figura 10.1 se observan los patrones espaciales de los reservorios de carbono de tres tipos de

bosques muy abundantes en Chile, destacándose los altos valores de carbono en el bosque típico de la zona centro-sur, del tipo forestal roble-raulí-coihue. También se denota la importancia del carbono presente en el suelo, lo cual se vuelve más evidente en bosques más mediterráneos, como el esclerófilo.

Si se considera el almacenamiento de carbono del suelo, dentro de los bosques con mayor reserva de carbono también se encuentran los bosques siempreverdes norpatagónicos, con una reserva media de casi el doble de la cantidad almacenada por unidad de superficie en los bosques intactos de la Amazonía (Pérez-Quezada et al., 2023), lo cual está dado por el tamaño de los árboles, su gran longevidad y la lenta tasa de descomposición de la materia orgánica. Lo anterior sitúa a Chile como un territorio clave en Sudamérica y en el mundo en términos de almacenamiento de carbono.

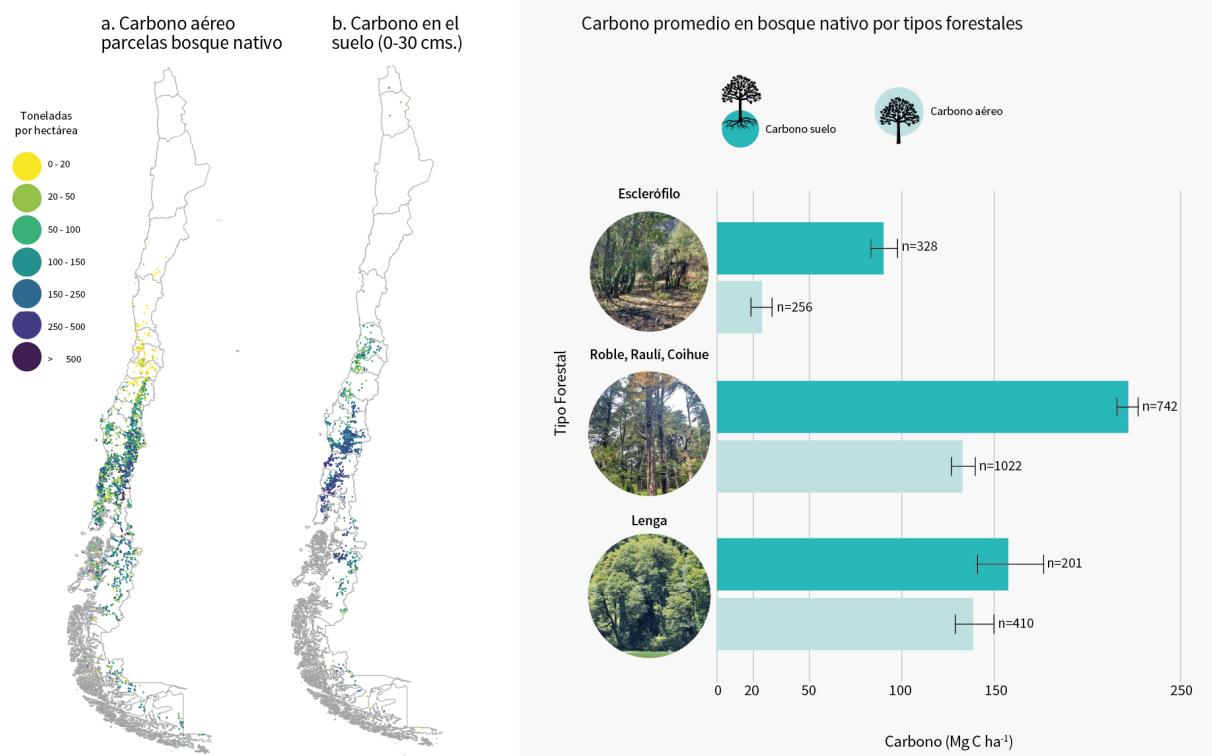


Figura 10.1. Distribución espacial del carbono en Chile. El mapa a. muestra las existencias de carbono aéreo derivadas de la biomasa arbórea, estimadas a partir del Inventario Forestal Nacional (INFOR) y de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). El mapa b. muestra el contenido de carbono en el suelo (en el horizonte 0-30 cm) (Pfeiffer et al., 2020). El panel derecho compara el carbono promedio en biomasa aérea y en el suelo para los tipos forestales esclerófilo, roble-raulí-coihue y lenga, mostrando una mayor acumulación de carbono en el suelo que en el componente aéreo y una alta concentración de carbono en bosques templados del sur en contraste con las menores acumulaciones en zonas semiáridas. El valor “n” indica el número de parcelas de las que se obtuvo la información.



Recuadro 3

Capturas y reservorios de carbono en bosques (Mauricio Galleguillos)

Si bien los flujos y reservorios están estrechamente relacionados, existen grandes diferencias en cuanto a las magnitudes y las implicancias que estos representan. Para ilustrar este hecho, se ha podido cuantificar que un bosque maduro siempreverde de Chiloé requiere 221 años de flujos de captura, con las condiciones ambientales presentes, para lograr un secuestro de carbono equivalente al contenido de carbono de su biomasa, incluyendo el suelo y la vegetación (Figura 10.2).

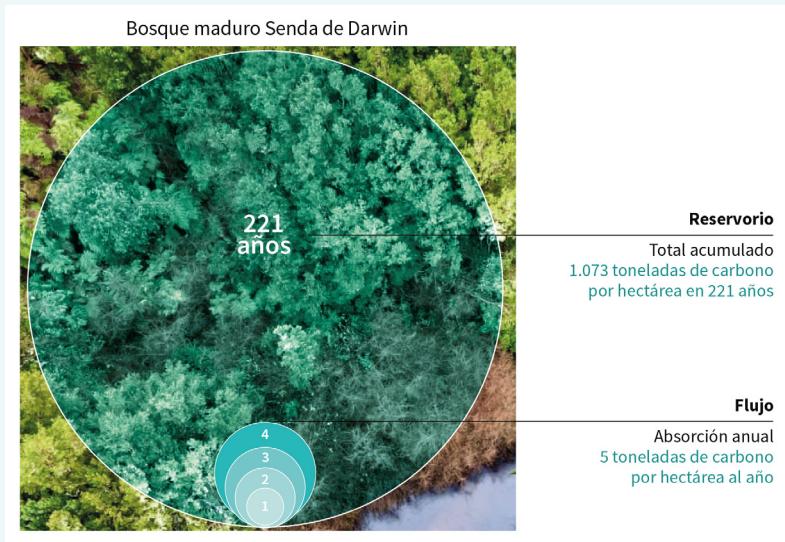


Figura 10.2. Relación entre flujos y reservorios de carbono en un bosque maduro de la Senda Darwin (Chiloé). El flujo corresponde a la absorción anual de carbono, mientras que el reservorio refleja el total acumulado en la biomasa y en el suelo.

Esto nos lleva a pensar en la importancia de mantener nuestros extensos y longevos reservorios en una condición tal que su carbono no empiece a disminuir, lo que podría ocurrir ante una degradación que favorezca emisiones positivas por sobre las capturas. Por otro lado, también nos hace reflexionar sobre estrategias basadas únicamente en capturas que permitan el secuestro del carbono en la vegetación a corto plazo, donde se aprecia claramente en la Figura 10.2 que estas son muy pequeñas en comparación con el carbono ya contenido en los ecosistemas naturales.

Los ecosistemas no solo almacenan carbono, sino que también absorben y respiran CO₂, intercambiando carbono con la atmósfera de manera permanente. Estos flujos pueden ser positivos si las emisiones de CO₂ superan su absorción o negativos si se captura más CO₂ del que se emite. Positivo implica que el balance es de emisiones a la atmósfera y negativo, de capturas desde la atmósfera. Este balance de flujos puede contabilizarse en diferentes escalas temporales, aunque para efectos de la carbono neutralidad suele considerarse la escala anual. Es importante destacar que este balance no es uniforme y depende de características muy específicas, como el tipo de ecosistema, su ubicación, su edad y su estado de salud (a diferencia de un ecosistema sano, un ecosistema degradado puede convertirse en una fuente emisora de CO₂). Tal es el caso de las turberas, donde se ha demostrado que la perturbación o el manejo productivo produce un **secuestro de carbono** considerablemente menor que el de las zonas no perturbadas (Cabezas et al., 2015; Valdés-Barrera et al., 2019). Asimismo, turberas degradadas por la extracción de musgo pasaron de ser un leve sumidero a un emisor moderado de carbono (Pacheco-Cancino et al., 2025).

En el caso de los bosques, se ha observado que los bosques templados maduros del sur de Chile actúan como importantes sumideros de carbono, pero en condiciones de degradación o de estrés hídrico pueden convertirse en emisores (Pérez-Quezada et al., 2018). La sensibilidad de estos bosques a las sequías estivales y a las olas de calor puede debilitar fuertemente su rol de sumidero al afectar el crecimiento de los árboles (Pérez-Quezada et al., 2018; Urrutia-Jalabert et al., 2021). Esto se ha visto marcadamente en la zona centro-sur de Chile donde bosques adultos de especies de *Nothofagus*: *N. macrocarpa* (roble de Santiago), *N. dombeyi* (coihue) y *N. pumilio* (lenja), presentan una tendencia negativa en el crecimiento durante décadas recientes, asociada a las condiciones más secas y cálidas (Venegas-González et al., 2018; Fajardo et al., 2019; Guzmán-Marín et al., 2024). Por su parte, el roble (*N. obliqua*), especie de amplia distribución nacional y con uno de los mayores crecimientos radiales (en tamaño de tronco), presenta una respuesta menos clara. En general, los bosques de roble de la zona norte disminuyen más su crecimiento durante una sequía que los de la zona sur, pero son capaces de recuperarlo y luego sostenerlo por más tiempo tras la ocurrencia de este tipo



de eventos, demostrando una mayor capacidad de resiliencia –entendida como la capacidad de recuperar los niveles de crecimiento previos a una sequía–. Además, no han mostrado una disminución en el crecimiento como lo que se ha reportado para el roble de Santiago durante décadas recientes. Se ha planteado que las condiciones del suelo y el aporte de agua de la napa freática podrían explicar esta condición debido a su capacidad para desarrollar raíces más profundas y absorber agua de esas zonas (Urrutia-Jalabert et al., 2023). Esta capacidad, sin embargo, puede causar una reducción en la absorción de nutrientes y puede llevar a la disminución permanente del crecimiento y de la eficiencia en el uso del agua a largo plazo (Quejereta et al., 2021, González de Andrés et al., 2021).

Dada la fuerte asociación positiva entre el crecimiento radial de *N. obliqua* y condiciones húmedas y frías, y considerando además los efectos negativos que puede tener para los árboles la absorción de agua de capas profundas –si es que se da el caso–, las proyecciones de cambio climático (disminución de las precipitaciones, aumento en la recurrencia e intensidad de las sequías y aumento de las temperaturas), implican una potencial merma en la captura de carbono de estos bosques y, por ende, una alta incertidumbre en relación a su capacidad de contribuir a la mitigación del cambio climático.



Capítulo 11: Carbono azul: una oportunidad estratégica para Chile

Laura Farías, Laura Ramajo, Ana María Ugarte y Martín Jacques-Coper

Chile posee una costa de más de 6.400 km de longitud, lo que representa un alto potencial para el cuidado y conservación de ecosistemas marinos costeros, considerados sumideros de carbono. Entre ellos destacan los humedales costeros, que cubren aproximadamente 130.000 hectáreas a lo largo del país. Estudios del Proyecto Humedales Costeros (gefhumedales.mma.gob.cl) estiman que estos almacenan en sus sedimentos un promedio de 90 toneladas de carbono orgánico por hectárea, lo que permite su enterramiento a largo plazo. De hecho, en ciertos lugares, las tasas de acumulación y enterramiento de carbono en sedimentos pueden ser hasta 50 veces más rápidas que lo que ocurre en suelos de bosques terrestres, lo que los convierte en formas de captura eficientes frente al cambio climático (Araya López & Messuto, 2020).

El territorio de Chile tiene relevancia global debido a la extensión y productividad de sus bosques de macroalgas, que cubren más de 5.600 km², principalmente concentrados en los fiordos de la Patagonia (Mora-Soto et al., 2020). Las macroalgas capturan grandes cantidades de CO₂ mediante fotosíntesis, transformándolo en biomasa (carbono orgánico) que, en parte, es enviada hacia zonas profundas o puede ser sedimentada y posteriormente enterrada durante largos períodos. Además, las macroalgas prestan múltiples servicios ecosistémicos, como la protección costera, la provisión de hábitat y el sustento de una alta biodiversidad (Marquet et al., 2021). Asimismo, contribuyen de forma sustantiva a la adaptación, ya que protegen la biodiversidad, estabilizan sedimentos, costas y playas, actúan contra la erosión y reducen los impactos de marejadas y la elevación del nivel del mar. Por ello, su conservación y restauración resultan fundamentales para la adaptación al cambio climático (Lovelock & Ree, 2020). Asimismo, estos ecosistemas mejoran la calidad del agua, fortalecen la seguridad alimentaria y generan nuevas oportunidades laborales, lo que favorece el bienestar de las comunidades costeras (Quiros et al., 2021).

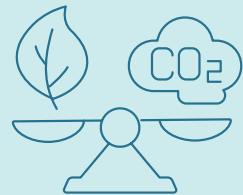
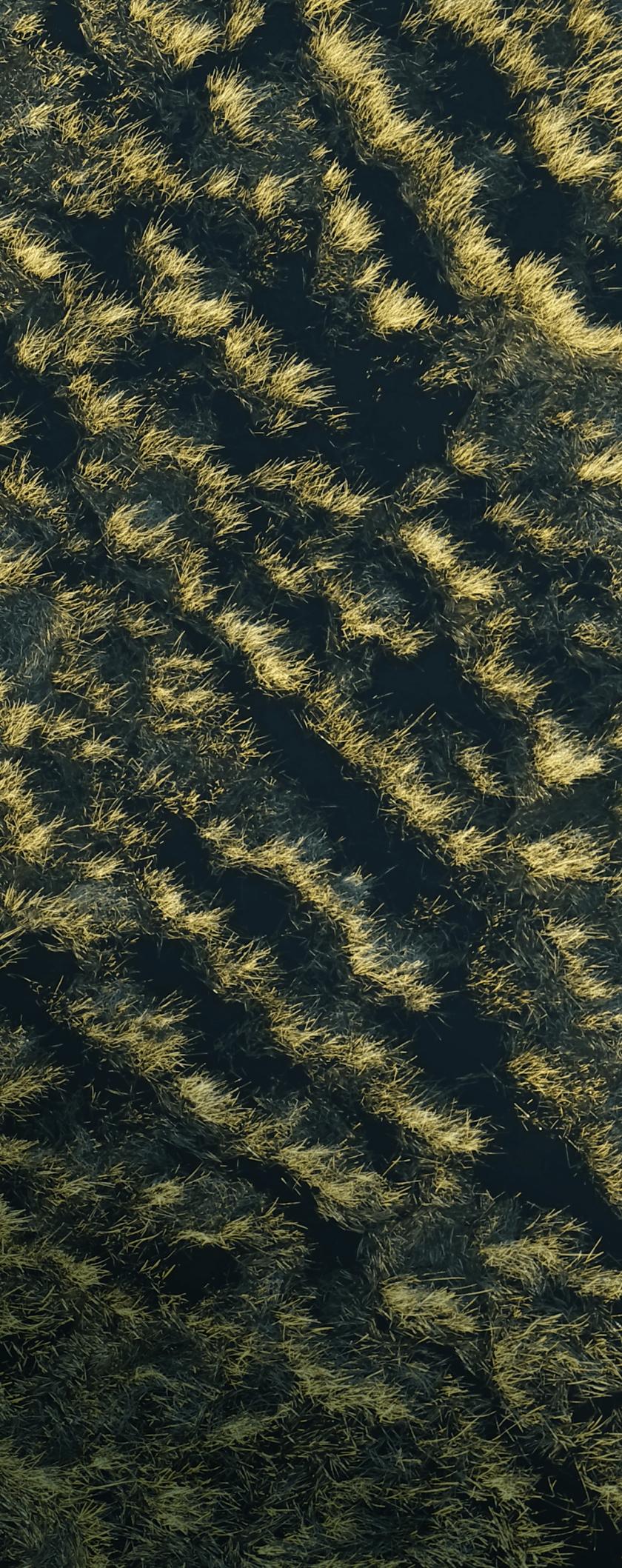
Estos bosques de macroalgas no han sido incluidos en la definición formal de carbono azul. Aunque asimilan cantidades significativas de CO₂, incluso superiores a las de los ecosistemas terrestres, no existe certeza de que el carbono se acumule y se entierre en sedimentos adyacentes. Esto ha llevado a considerarlos como contribuyentes potenciales al secuestro de carbono (Krause-Jensen & Duarte, 2016). Aunque aún no son reconocidos formalmente como sumideros por el IPCC (2019), su rol potencial en la mitigación climática está siendo cada vez más valorado por la ciencia.



Sección 3:

Carbono neutralidad y gobernanza climática en Chile

- La política climática de Chile es una política de Estado que se enmarca en el multilateralismo, principalmente el Acuerdo de París. Con esto, el país desarrolló la Ley Marco de Cambio Climático chilena (ley N° 21.455), que establece metas de carbono neutralidad y resiliencia.
- Esta Ley, publicada en junio de 2022, está en proceso de implementación a nivel sectorial, regional y comunal, con desafíos como las reformas legales necesarias para alcanzar la carbono neutralidad, el seguimiento y medición de las medidas, y la heterogeneidad de capacidades a nivel local.
- Las metas de carbono neutralidad y desarrollo resiliente al clima (DRC) marcan el futuro que Chile espera alcanzar y debiera resguardar mediante un camino que integre mitigación y adaptación, desde una acción climática justa, como propone la Estrategia Nacional de Transición Socioecológica Justa (ENTSJ).



Sección 3: **Carbono neutralidad y gobernanza climática en Chile**

Esta sección analiza la trayectoria, desafíos y avances de la política pública, y la gobernanza climática en Chile, en el marco del compromiso del Estado con la carbono neutralidad. Se abordan los enfoques adoptados en mitigación y adaptación, la evolución institucional y normativa, y la implementación de la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC), publicada en junio de 2022. En línea con el cumplimiento de los compromisos internacionales, en particular el Acuerdo de París, la LMCC consagra la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) como instrumento de gestión del cambio climático, lo que da a todo su contenido un carácter legal.

Además, esta sección presenta ejemplos de áreas donde poner atención para lograr la carbono neutralidad con justicia climática, como son las reformas legales necesarias y el seguimiento del grado de avance de los planes y la Estrategia Nacional de Transición Socioecológica Justa (ENTSJ).



Capítulo 12:

Marco normativo para la gobernanza climática y la carbono neutralidad

Pilar Moraga

La política climática de Chile se ha desarrollado alineada con los acuerdos internacionales. La Figura 12.1 muestra los principales hitos en la historia de la política climática en el país, desde la elaboración de la primera Estrategia Nacional de Cambio Climático en 2006 y el Plan de Acción Nacional en 2008 hasta la promulgación de la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC), que establece las reglas que rigen la gobernanza climática en Chile a partir del 13 de junio de 2022.

La Ley Marco de Cambio Climático chilena (ley N° 21.455) define como metas lograr y mantener la carbono neutralidad a partir del año 2050, dando cumplimiento a compromisos internacionales (artículo 1º). La Ley manda la elaboración de instrumentos de política pública y sus responsables a distintos niveles para definir cómo se llegarán a las metas establecidas. Al mismo tiempo, la LMCC considera las metas intermedias que fija la NDC de Chile, por lo que estas son metas de carácter legal (Moraga, 2024).

En conformidad con los compromisos asumidos en el Acuerdo de París, la LMCC instala un modelo de gobernanza que sienta las bases para superar las debilidades existentes hasta ese momento (Moraga, 2024). Este modelo responde a las recomendaciones formuladas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en el informe de Desempeño Ambiental de 2016. Las debilidades que la nueva legislación intenta superar son: 1. Falta de integración y la fragmentación institucional, 2. Falta de anticipación en la toma de decisiones y una actuación más bien reactiva del aparato del Estado, 3. Falta de toma de decisiones basadas en evidencia científica, 4. Debilidades en materia de participación ciudadana, y 5. Rendición de cuentas (Billi et al., 2020).

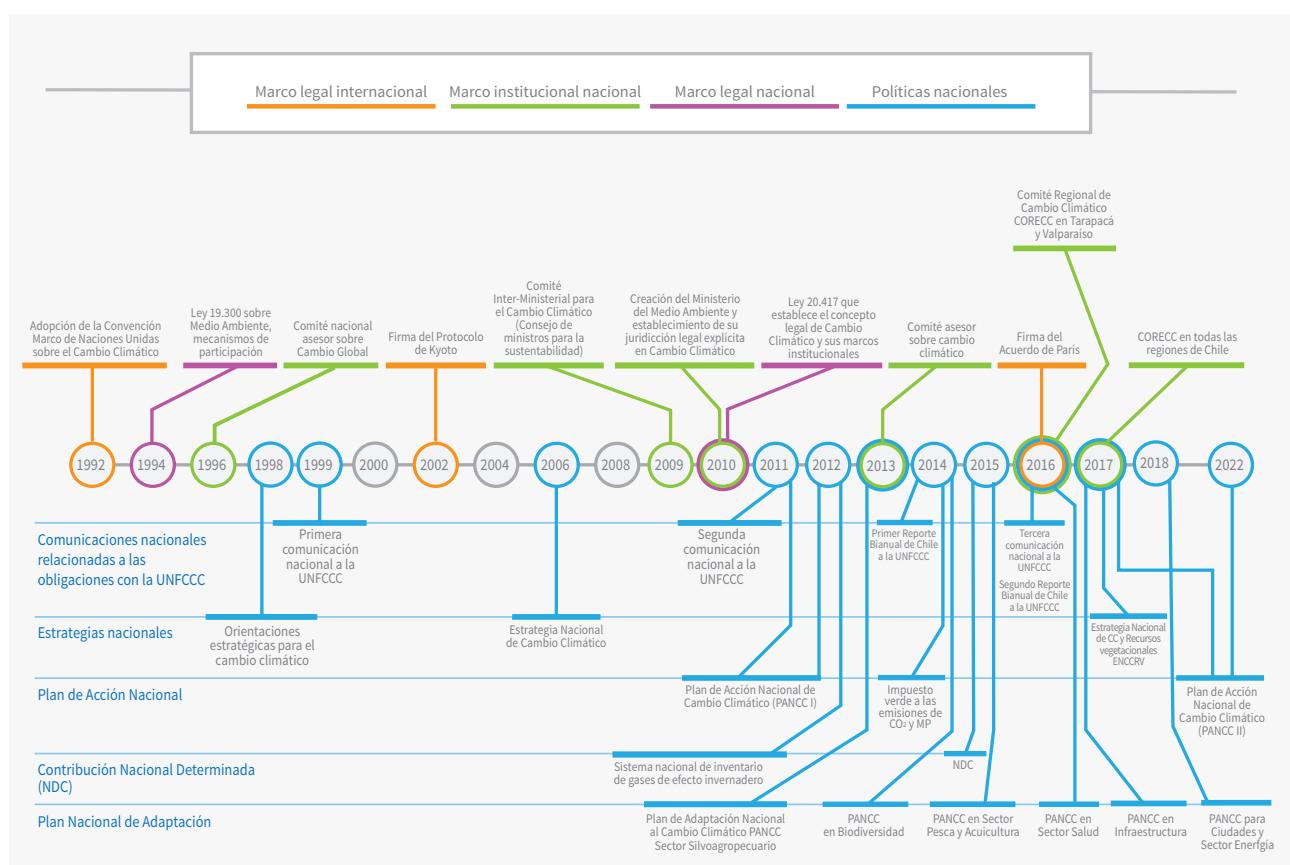


Figura 12.1: Principales hitos en la historia de la política climática en Chile. Fuente: Elaboración propia.



La LMCC propone un modelo de gobernanza del cambio climático vinculado a la agenda internacional, estableciendo objetivos y metas de mitigación, adaptación y resiliencia, al tiempo que define un marco institucional e instrumentos para su gestión, mecanismos de monitoreo, reporte y verificación, y mecanismos de participación y cumplimiento.

Como muestra la Figura 12.2, los instrumentos de gestión son multinivel. En el nivel nacional están: la NDC, la Estrategia Climática de Largo Plazo, los Planes Sectoriales de Mitigación y Adaptación; y, a nivel subnacional: los Planes de Acción Regional de Cambio Climático (PARCC), los Planes de Acción Comunal de Cambio Climático (PACCC) y los Planes Estratégicos de Cuencas, que deben asegurar acciones concretas para alcanzar los objetivos y metas propuestos por este nuevo marco legal, como es la carbono neutralidad.

Luego de publicada la LMCC, comenzó su implementación por parte de organismos del Gobierno con responsabilidad en el diseño y ejecución de los planes de acción climática. La Ley mandata el involucramiento de autoridades sectoriales de nivel nacional y regional, de gobiernos regionales y municipales (para este último, ver Recuadro 4), y establece los contenidos que deben tener los instrumentos de gestión a cargo de los distintos actores responsables.

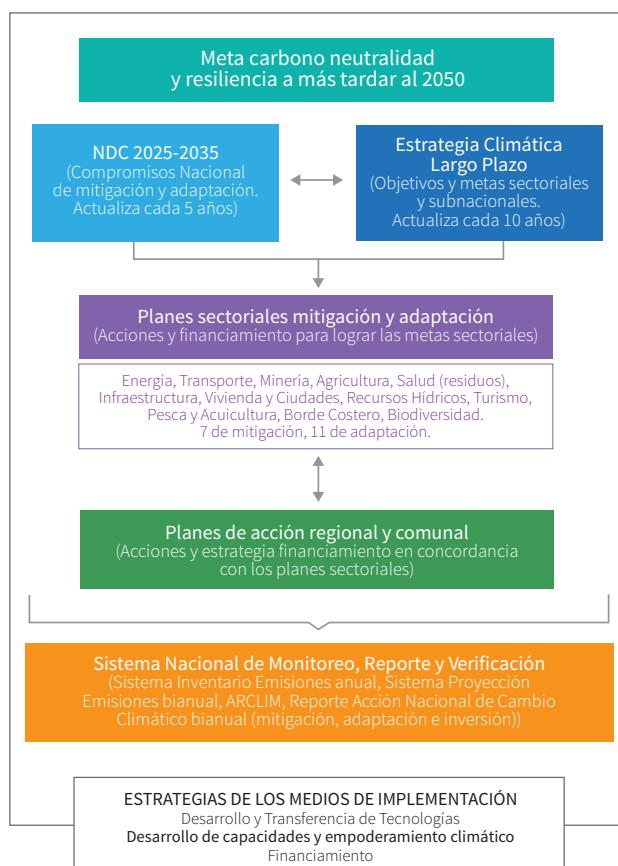


Figura 12.2: Instrumentos de gestión. Fuente: MMA

Recuadro 4

Planes de Acción Comunal de Cambio Climático (PACCC): una apropiación dificultosa (Antoine Maillet)

Los PACCC son documentos estratégicos que indican cómo una comuna cumplirá con el compromiso de contribuir a las metas de carbono neutralidad y resiliencia que establece la LMCC, con acciones de mitigación y adaptación al cambio climático en el corto, mediano y largo plazo, definiendo metas e indicadores de seguimiento.

La obligación de desarrollar instrumentos de acción climática en un plazo relativamente acotado (tres años desde la publicación de la LMCC) y, sin asignar un financiamiento destinado a ello, constituyó un desafío para los municipios del país, los que son muy diferentes entre sí respecto a recursos económicos.

El mandato legal y las posibles sanciones asociadas han contribuido a que estos planes sean percibidos como una exigencia impuesta desde el nivel central. Esta dificultad de apropiación del instrumento se ha traducido en que a junio de 2025 solamente 95 de los 345 municipios contaban con PACCC, 160 estaban en etapa de formulación, mientras que 90 no presentaron avances en la elaboración.

Para los municipios que han dado este paso en materia de política climática local, destaca como factor explicativo la trayectoria ambiental y climática previa. Esta experiencia anterior se ve reflejada en haber desarrollado voluntariamente Planes Locales de Cambio Climático (desde fines de los años 2010) o en alcanzar niveles avanzados en el Sistema de Certificación Ambiental Comunal.

Los equipos del área medioambiental muchas veces se ven obligados a elegir entre el desempeño de sus funciones habituales y la elaboración del PACCC. Esta tensión suele conducir a la mayoría de los municipios a la decisión de externalizar su formulación, incluso en los municipios que cuentan con un amplio desarrollo de la dirección de medioambiente. Sin embargo, recurrir a un actor externo no está exento de sus propias dificultades, no solo por el costo elevado que supone, sino también para conducir el trabajo, y luego para la implementación de un texto que será, a su vez, de difícil apropiación (Maillet et al., 2025).



Estos actores pueden colaborar formalmente con las medidas de acción climática, dejando sus alianzas establecidas en sus planes.

En junio de 2025, a tres años de la publicación de la Ley, todos los planes, en todos los niveles, debieron estar terminados; sin embargo, aún queda tarea pendiente. Un seguimiento del estado de los planes puede encontrarse en el Observatorio de la LMCC (ver Recuadro 5).

En cuanto a los instrumentos de nivel nacional, la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) estuvo en proceso de actualización durante 2025 y los Planes Sectoriales terminaron sus procesos de elaboración este mismo año. Sin embargo, el análisis del nivel de cumplimiento de los contenidos legales exigidos por la legislación en la formulación de planes sectoriales muestra un panorama incompleto.

La LMCC establece como responsables de la dictación de los Planes Sectoriales de Mitigación a distintos ministerios. Si bien los planes existen, ninguno cumple de manera totalmente satisfactoria con lo exigido por la LMCC, siendo los planes más completos los de los ministerios de Energía, Transporte y Telecomunicaciones, y Salud. La mayoría de las deficiencias observadas están en la inclusión de mecanismos de monitoreo, reporte y verificación, lo que dificulta asegurar el logro de la meta de carbono neutralidad.

El análisis de cumplimiento en los contenidos de estos Planes también muestra deficiencias. En su mayoría no son satisfactorios en ajustar sus contenidos a lo requerido por el legislador. El mejor desempeño desde este punto de vista lo tienen el Plan de Adaptación de Energía y el de Recursos Hídricos. El desafío recurrente está en la identificación de mecanismos de monitoreo, reporte y verificación (Moraga & Salinas, 2025).

Recuadro 5

Observatorio de la Ley Marco de Cambio Climático y supervisión independiente de la meta de carbono neutralidad (Cecilia Ibarra y Pilar Moraga)

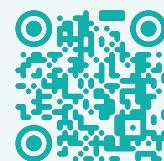
El Observatorio de la Ley Marco de Cambio Climático, impulsado por el CR2, realiza de manera independiente un seguimiento de los avances de la Ley a fin de mostrar el estado de cumplimiento en diversas áreas como planificación, institucionalidad, regulación, sistemas de información, participación y modificaciones a la gestión ambiental.

La academia y las organizaciones ciudadanas que, más allá de su compromiso con la acción climática, no tienen responsabilidad legal en el proceso pueden cumplir un rol como observadores independientes, realizando un seguimiento a la implementación de la LMCC. Este rol provee de un contrapeso en la evaluación del avance de la Ley y sus impactos y en la reflexión respecto de las posibilidades de desarrollo resiliente al clima, promoviendo el diálogo, la acción climática informada y fortaleciendo la democracia.

El análisis realizado por el Observatorio, a tres años de la publicación de la LMCC, muestra debilidades en la formulación de los planes, en particular en el monitoreo, registro y verificación.

OBSERVATORIO **Ley Marco de Cambio Climático** para Chile

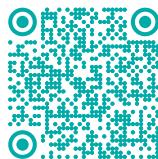
Hacia un nuevo pacto social





Capítulo 13: Reformas legales para lograr la carbono neutralidad

Dominique Hervé y Cecilia Ibarra



Informe Reformas legales para la carbono neutralidad

Las acciones necesarias para alcanzar la meta de carbono neutralidad en Chile al 2050 requieren de un marco regulatorio que garantice su cumplimiento. Como se vio en el capítulo anterior, la LMCC es la base que consagra como parte de la normativa a las NDC y la ECLP. No obstante, las medidas propuestas en los planes están sujetas a un marco regulatorio más amplio, compuesto por diversos cuerpos normativos vinculados a los sectores definidos en la ECLP y en las NDC.

El CR2 se ha propuesto identificar las reformas legales que deben acompañar la consecución de esta meta. Al año 2020 (Moraga et al., 2020) se concluyó que dichas reformas se pueden clasificar de la siguiente manera: meta nacional de limitación de CO₂, medidas basadas en la acción humana (energía, transporte, forestal), medidas basadas en la naturaleza (humedales, turberas, macroalgas, ecosistemas marinos, bosques naturales) y medidas de gobernanza (fortalecimiento de acceso a la información, participación de diversos niveles de actores, equidad).

A partir de las medidas y reformas legales necesarias para lograr la carbono neutralidad identificadas al 2020, se puede confirmar que se ha avanzado considerablemente en los últimos cinco años. En efecto, se han hecho reformas que permiten avanzar en las medidas propuestas, como:

- La dictación de la Ley N° 21.202 de Humedales Urbanos (2020).
- La Ley N° 21.210 que moderniza la legislación tributaria (2020 y sus reglamentos de 2022 y 2023, que crea el sistema de compensación de emisiones del impuesto verde).
- La Ley N° 21.305 sobre Eficiencia Energética (2022 y la elaboración del Plan de Eficiencia Energética).
- La Ley N° 21.435, que Reforma el Código de Aguas (2022).
- La Ley N° 21.505 (2022) que promueve el almacenamiento de energía eléctrica y la electromovilidad.
- La Ley N° 21.600 que crea el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (2023).
- El Decreto Supremo N° 5 de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente.

- La Norma Primaria de Calidad del Aire para COV Benzeno.
- El Decreto Supremo N° 30 de 2023, del Ministerio del Medio Ambiente, que modifica el Reglamento del SEIA, a partir de la aprobación de la LMCC y el Acuerdo de Escazú.
- La Ley N° 21.651 de 2024 que modifica la Ley de Pesca y Acuicultura en el ámbito de los recursos bentónicos (incluye prohibición de extracción de algas en ciertos casos).
- La Ley N° 21.660, sobre Protección Ambiental de las Turberas (2024).

Sin embargo, la dictación de la LMCC en 2022 reconfiguró el marco jurídico nacional analizado el 2020, incorporando un modelo de gobernanza y de instrumentos de gestión del cambio climático que permiten identificar la necesidad de reformas legales a partir de las medidas de acción climática que se incorporan en tales instrumentos. Las medidas contempladas en los diversos planes sectoriales de mitigación y adaptación determinan la hoja de ruta para la carbono neutralidad en el país y permiten identificar las necesidades actuales de reforma normativa. Estos planes ponen desafíos al Estado para elaborar, adecuar o modificar sus marcos regulatorios, fomentando la coordinación y colaboración entre organismos públicos, y entre diferentes sectores y escalas. La acción climática se potencia con la integración de esfuerzos, evitando duplicidades y contradicciones, y planteando indicadores desafiantes respecto de la situación actual.

Actualmente, ya se encuentran elaborados todos los planes sectoriales de mitigación y adaptación que manda la Ley. Sin embargo, estos planes todavía deben ser implementados. Del análisis de las medidas contenidas en dichos planes es posible identificar las reformas legales y normativas necesarias para su cumplimiento. Ejemplos de las reformas necesarias para la carbono neutralidad se presentan en la tabla 3. Estas reformas legales son determinantes para que las medidas propuestas en estos planes se cumplan.

**Tabla 3.** Ejemplos de reformas legales necesarias para alcanzar la carbono neutralidad.

Sector	Reformas necesarias
Energía: Plan de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático de Energía, pg. 55, 56 y 134	Modificación de la Ley General de Servicios Eléctricos, la actualización de la norma de emisión para centrales termoeléctricas del D.S N° 11/2013 del Ministerio del Medio Ambiente y el desarrollo de una propuesta de modificación del impuesto a las emisiones del artículo 8° de la ley N° 20.780.
Transportes: Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del Sector Transportes, pg. 130 y 237	Propuesta de una Ley de Movilidad Sustentable y Segura, y el desarrollo de la normativa para los Combustibles de Aviación Sostenible (SAF).
Silvoagropecuario: Plan de Adaptación al Cambio Climático Sector Silvoagropecuario, pg. 57.	Modificación de la Ley N° 20.283 sobre Bosque Nativo, y dictación de una nueva ley de fomento forestal para la creación de nuevas coberturas forestales.
Agricultura: Plan de Mitigación al Cambio Climático Sector Agricultura, pg. 33.	La propuesta de biodigestores de purines porcinos requiere modificar el D.S N° 9/2022 del Ministerio del Medio Ambiente que establece la norma de emisión de contaminantes en planteles porcinos.
Zona Costera: Plan de Adaptación al Cambio Climático de la Zona Costera, pg. 56 y 58 (en consulta)	Actualización del D.S N° 475/1995 del Ministerio de Defensa Nacional que establece la Política Nacional de Uso del Borde Costero y la modificación del Reglamento sobre Concesiones Marítimas.
Pesca y Acuicultura: Plan Sectorial de Adaptación al Cambio Climático en Pesca y Acuicultura, pg. 41	Actualización del D.S N° 123/2003 del Ministerio de Economía, que aprueba la Política Nacional de Acuicultura.
Biodiversidad: Plan Sectorial de Adaptación al Cambio Climático en Biodiversidad, pg. 62.	Desarrollo de la reglamentación de la Ley N° 21.660 sobre Protección Ambiental de las Turberas.
Ciudades: Anteproyecto Plan Sectorial de Mitigación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo y Actualización del Plan Sectorial de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades, pg. 97.	Reforma de la Ley General de Urbanismo y Construcciones y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción para integrar criterios de mitigación y adaptación al cambio climático en zonas rurales y urbanas.

Cabe señalar también que algunos cuerpos legales relevantes para el cumplimiento de las medidas identificadas como necesarias para lograr la carbono neutralidad ya se encuentran en tramitación legislativa, como el Proyecto de Ley que reforma la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, el Proyecto de Ley que busca fortalecer la institucionalidad ambiental y mejorar su eficiencia (reforma a la Ley Orgánica de la Superintendencia del Medio Ambiente), el Proyecto de Ley Marco de Suelos, y el proyecto de ley que Regula la Prevención de Incendios Forestales y Rurales. A su vez, leyes como la del Servicio de Biodiversidad y Áreas protegidas, aún tienen pendiente la dictación de reglamentos para su puesta en marcha.



Recuadro 6

El suelo y la carbono neutralidad: una Ley Marco de Suelo (Claudia Rojas)

La LMCC reconoce a los suelos como sumideros de carbono en su artículo 3 letra u sobre definiciones. No obstante, este marco legal no contempla instrumentos específicos para promover el manejo sostenible de los suelos ni para resguardar sus reservas de carbono, limitando así su potencial aporte a la mitigación del cambio climático. Un ejemplo lo constituye la NDC de Chile 2025, donde se destaca que el único sector a nivel nacional que consistentemente captura CO₂ atmosférico es el sector Uso de la Tierra, Cambio del Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS), que en 2022 representó el 34 % del balance nacional de GEI. No obstante, el potencial de captura de suelos —particularmente los suelos minerales, que constituyen el principal reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres— no se incorpora de manera explícita. Esta diferencia refleja que, si bien turberas y humedales son considerados suelos orgánicos en la ciencia del suelo, en los inventarios de GEI se abordan como categorías específicas. Esta omisión evidencia la necesidad de contar con instrumentos legales que reconozcan y gestionen de manera integral el rol de los suelos en la regulación del carbono y otros servicios ecosistémicos.

La Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo buscó contar con una ley que promoviera la gestión sostenible de los suelos en el país. Sin embargo, no fue sino hasta el año 2021 cuando se logró ingresar al Senado de la República un Proyecto de Ley Marco de Suelos, que hasta septiembre de 2025 seguía en tramitación. Este trabajo, en conjunto con otras instituciones y personas, dio forma a un anteproyecto de Ley que tenía como *objeto la protección, conservación y restauración de los suelos, a través de la regulación del uso y gestión sostenibles del suelo, con la finalidad de evitar su destrucción y degradación; y promover su identificación, estudio, clasificación y conocimiento; considerando los tratados internacionales ratificados por Chile que se encuentren vigentes e inciden sobre la materia.*

Si bien el ingreso del Proyecto de Ley Marco de Suelos al Senado constituye un avance significativo para el país, este difiere de la propuesta inicial elaborada por expertos, que planteaba como objetivo central la protección de los suelos en todo el territorio nacional y de los servicios ecosistémicos que prestan, incluyendo su rol en la captura y el almacenamiento de carbono.

Capítulo 14: Sinergias entre adaptación y mitigación para lograr la carbono neutralidad

Paulina Aldunce y Gabriel Barrantes



Informe Sinergias entre adaptación y mitigación

En un país como Chile, altamente vulnerable al cambio climático, la integración de las acciones climáticas de mitigación y adaptación constituye una estrategia evidente. Las sinergias y cobeneficios generados por esta integración pueden ser una forma efectiva y equitativa de abordar el cambio climático (IPCC, 2022) y aportar a la meta de carbono neutralidad. Desde la perspectiva del desarrollo resiliente al clima (DRC) la integración mitigación-adaptación es un principio rector para alinear decisiones, hacer planificación territorial e inversiones que reduzcan emisiones y, a la vez, proteger a las personas y los territorios que habitan (IPCC, 2022).

Las sinergias mitigación-adaptación permiten respuestas más eficientes, evitando conflictos entre políticas y potenciando cobeneficios sociales, ambientales y económicos (Adaptation Committee, 2020; OCDE, 2021; Qi & Terton, 2022).

Sin embargo, las sinergias mitigación-adaptación no ocurren automáticamente, pues requieren planificación intersectorial, y participación inclusiva bajo los principios de justicia y coherencia entre niveles de gobernanza. En el caso de Chile, la LMCC consagra un principio de coherencia mitigación-adaptación, e incorpora mecanismos de sinergia en instrumentos como la ECLP y la NDC. Su Reglamento (Decreto N° 16/2023, MMA) establece que los planes sectoriales pueden incluir un componente de integración que aborde mitigación y adaptación de manera conjunta, promoviendo sinergias —como por ejemplo, soluciones basadas en la naturaleza-. Sin embargo, aún no existe una metodología, conceptualización ni procedimiento definidos para operacionalizar esa integración en Chile (Tepual Conservación, 2025). Desde la óptica del desarrollo resiliente al clima (DRC), el desafío está en traducir ese mandato en una práctica efectiva.

Una revisión realizada por el CR2 de los Planes Sectoriales, tanto de mitigación como de adaptación, evidencia un tratamiento heterogéneo de la integración mitigación-adaptación (Aldunce & Barrantes, 2025). En algunos casos, el enfoque aparece explícito. Por ejemplo, en el Plan de Mitigación y Adaptación del Sector Energía, todas las medidas de adaptación incluyen un análisis de mitigación y cobeneficios en su sección de sinergias de la medida (Ministerio de Energía, 2024: pág. 122), o con menciones en alguna parte del texto. En otros casos, aparece de manera implícita, sin abordar la integración como tal.



Cuando la integración es explícita, se hace visible cómo cada medida no solo reduce emisiones o riesgos, contribuyendo a la carbono neutralidad, sino cómo contribuye al DRC. En tanto, cuando es implícita, los planes sectoriales igualmente tienen alto potencial para articular mitigación-adaptación hacia el DRC y carbono neutralidad. Para aprovecharlo, se requiere una guía que operacionalice la integración mitigación-adaptación, superando el “listado de cobeneficios” y que se convierta en una arquitectura de decisiones que acelere la carbono neutralidad mientras construye DRC, que se recomienda incluir en la guía para el diseño de planes sectoriales.

Explicitar la integración en cada medida –con metas de DRC, carbono neutrales, responsables, presupuesto y seguimiento– permitirá identificar, priorizar y financiar acciones y coordinar a los equipos de mitigación y adaptación. Con esto aumentaría la velocidad y escala de la acción climática, y los cobeneficios dispersos se transformarían en resultados medibles para las personas y los territorios. Finalmente, mecanismos de participación temprana y garantías de justicia en sus diferentes dimensiones pueden asegurar que la integración mitigación-adaptación sea el hilo conductor que articule ambición, coherencia y resultados tangibles.

Componente de integración mitigación y adaptación (M+A)

Cuando una medida incorpora mitigación y adaptación como parte de una relación sinérgica o de co-beneficio.

Sinergia

Plan, política o acción de mitigación y adaptación que interactúan entre sí para producir mejores resultados y aumentar la efectividad en comparación a si se abordan por separado, produciendo un efecto mayor que la suma de sus partes.

Ejemplo de Sinergia

Parques verdes urbanos, que capturan CO₂ (mitigación) y reducen impactos de olas de calor e inundaciones (adaptación).

Co-beneficio

Plan, política o acción que logra enlazar un objetivo de mitigación con adaptación, y viceversa. Generando un efecto positivo y aumentando así el beneficio total.

Ejemplo de Co-beneficio

Medidas de eficiencia energética de hogares para la reducción de consumo de leña o energía. Objetivo principal de reducir emisiones (mitigación) con co-beneficio en menor dependencia de energías (adaptación).

Trade Off (Compensación)

El logro de un objetivo de mitigación disminuirá el logro de objetivos de adaptación y viceversa. Reduciendo así el potencial de beneficio neto para la acción climática.

Mitigación

- Entorpece la adaptación.
- Aumenta la vulnerabilidad e impactos climáticos.

Adaptación

- Maladaptación.
- Entorpece esfuerzos de mitigación.
- Genera emisiones significativas.

Recuadro 7

Cobeneficios en salud al 2050: evidencia para una mitigación con justicia (Raúl O’Ryan)

Los cobeneficios son resultados de una acción climática que aporta beneficios a más de un objetivo de política pública. Avanzar hacia la carbono neutralidad no solo implica reducir emisiones de GEI, sino también generar beneficios directos y cuantificables para la salud de la población. Estos cobeneficios surgen de la disminución de contaminantes atmosféricos locales como el material particulado fino (MP_{2.5}), dióxido de nitrógeno (NO₂) y carbono negro.

El escenario CN1 del Plan Sectorial de Energía incorpora una serie de medidas con impactos inmediatos en la calidad del aire urbano. Entre ellas destacan:

- Reemplazo progresivo del uso de leña residencial por calefacción eléctrica, bombas de calor y otras alternativas limpias.
- Electromovilidad en el transporte liviano y mayor participación del transporte público eléctrico.
- Descarbonización de la matriz eléctrica, con cierre anticipado de centrales a carbón y expansión acelerada de energías renovables.
- Normas más estrictas para emisiones industriales y mejoras tecnológicas en procesos productivos.

Como resultado, ya al año 2030 se observaría una mejora significativa en la calidad del aire y, con ello, en indicadores clave de salud pública, logrando la prevención de casi 3.000 muertes prematuras y similar número de hospitalizaciones por causas respiratorias y cardiovasculares. Estos beneficios en salud aumentan al aplicarse medidas crecientemente estrictas, llegando el año 2050 a una reducción en el valor esperado de la mortalidad de sobre 25.000 casos y de sobre 21.000 admisiones hospitalarias evitadas a lo largo de todo Chile, en comparación con un escenario de referencia sin nuevas políticas.

Figura 14.1: Integración entre acciones de adaptación y mitigación climática. Fuente: Aldunce, P. y Barrantes, G. 2025.



Recuadro 8

Manual CR2 para el diseño de planes de acción climática: un aporte a la sinergia entre adaptación y mitigación (Bárbara Morales y María Ignacia Silva)

El Manual CR2 de Implementación de Talleres para la Elaboración de Planes de Acción Climática ofrece una guía práctica y metodológica para apoyar la planificación y realización de talleres orientados a la formulación de planes regionales y comunales de cambio climático (PARCC y PACCC), en coherencia con los lineamientos de la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC).

Con el propósito de promover que la integración entre mitigación-adaptación sea el hilo conductor de la planificación climática territorial, el Manual propone abordar ambos componentes de manera conjunta desde las etapas iniciales del diseño del plan. Esta integración se concreta en actividades de reconocimiento y caracterización del territorio, donde se superponen mapas de riesgo y sectores emisores de GEI, permitiendo identificar zonas prioritarias que requieren intervenciones simultáneas.

Más allá de centrarse únicamente en los cobeneficios o en el potencial sinético de las medidas, la metodología busca que la planificación y priorización de medidas, así como de acciones e indicadores de seguimiento, incorpore desde un inicio las vulnerabilidades, capacidades y oportunidades específicas de cada territorio. Esto permite avanzar hacia una acción climática más contextualizada y coherente con las realidades locales.

Además, la evaluación de las medidas se realiza bajo criterios de pertinencia territorial, equidad de género, participación comunitaria y sinergias institucionales, reforzando así un enfoque de planificación que no solo integra mitigación y adaptación desde etapas tempranas, sino que también promueve un DRC guiado por los principios de justicia climática.



La valorización económica de estos beneficios en salud —en términos de costos evitados en atención médica, días laborales perdidos y bienestar social— supera los US\$ 1.500 millones anuales al 2030.

Al 2050 este beneficio supera los US\$ 13.000 millones, fundamentalmente por la significativa reducción de las emisiones producto de la combustión de leña en los hogares. Estos beneficios se concentran en zonas urbanas y vulnerables del centro-sur del país.

Estas cifras equivalen a una fracción relevante del esfuerzo de inversión requerido para implementar las medidas de mitigación, superando al 2 % del PIB nacional en 2050, justificando su adopción desde una perspectiva costo-efectiva y socialmente justa.

Tabla 4. Reducción proyectada de impactos en salud y su valorización económica.

Año	Muertes evitadas por año	Admisiones hospitalarias evitadas por año	Valor económico total (MUSD/año) de cobeneficios en salud
2030	2.947	2.639	\$ 1.573
2040	9.266	8.238	\$ 4.934
2050	25.033	21.601	\$ 13.303

Fuente: Secciones 8.3.2 y 8.3.3, Informe Final Actualización NDC 2025 (Centro de Energía, U. de Chile).



Recuadro 9

Hidrógeno verde y carbono neutralidad: incertidumbre tecnológica y en el uso nacional (Antoine Maillet, Rodolfo Sapiains, Claudia Alonso, Hanne Wiegel, Dominique Hervé, Valentina Cariaga y Gustavo Blanco)

El hidrógeno “verde” o H2V (donde la electrólisis se realiza con electricidad proveniente de fuentes renovables) ha sido promovido como una solución para descarbonizar la matriz energética, especialmente en Chile, donde se ha construido un relato político para que el país sea un líder mundial en su producción. En los últimos años, el Estado ha impulsado fuertemente esta industria mediante políticas públicas, acuerdos internacionales y financiamientos, enfocándose principalmente en las regiones de Antofagasta y Magallanes.

Más allá de los cuestionamientos científicos respecto a la efectividad real del H2V para combatir el cambio climático, su impacto en la carbono neutralidad de Chile depende de que esta energía sea consumida dentro del territorio nacional, algo que no está claro que vaya a ocurrir debido a sus altos costos comparativos con otras fuentes renovables, y que por ejemplo en el caso de los proyectos en Magallanes, ni siquiera es su objetivo pues se trata de proyectos destinados en su totalidad para exportación. Así, el H2V producido en territorio nacional podría eventualmente contribuir a la descarbonización de países ricos que lo compren, pero tendrá cero impacto en la carbono neutralidad de Chile. Más aún, considerando que los proyectos más grandes ingresados al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) en Magallanes tienen como producto principal el amoníaco, no el hidrógeno, cuyo uso central es como fertilizante.

Esto último adiciona más incertidumbre respecto a los beneficios para la carbono neutralidad de esta industria, pues el uso de amoníaco implica mitigar las emisiones de compuestos de nitrógeno reactivo a lo largo de toda su cadena de valor, debido a los impactos que estos tienen en la calidad del aire, la salud humana, los ecosistemas y el clima. De hecho, uno de los mayores riesgos de la producción de amoníaco se asocia a la formación de óxido nítrico, un potente gas de efecto invernadero y sustancia agotadora del ozono estratosférico.

Por todo ello, se propone que el Estado reevalúe la Estrategia de H2V considerando la mejor evidencia científica disponible y los altos grados de incertidumbre asociados. Además, atender adecuadamente los múltiples cuestionamientos respecto a los posibles impactos sociales y ambientales que su posible instalación tendría en los territorios, las señales negativas del mercado internacional respecto a la viabilidad comercial de la industria, y las interrogantes sobre la magnitud, ritmo y pertinencia de las inversiones públicas ya comprometidas. Las miles de observaciones realizadas por instituciones públicas y la ciudadanía a los proyectos ingresados al SEIA Magallanes evidencian serios cuestionamientos a la calidad de los proyectos, algo que refuerza la importancia de una política que garantice una acción climática justa y basada en evidencia científica.





Capítulo 15:

Transición Socioecológica Justa: eje para la carbono neutralidad y el desarrollo resiliente al clima en Chile

Roxana Bórquez y Raúl O’Ryan

Las metas de carbono neutralidad y el DRC marcan un futuro que Chile desea alcanzar, y la Transición Socioecológica Justa (TSJ) indica cómo el país quiere trazar el camino para alcanzar dichas metas. Así, el 4 de septiembre de 2025, el Gobierno de Chile dio a conocer la actualización de sus NDC, reafirmando el compromiso de lograr la carbono neutralidad al año 2050, y presentó, como parte del pilar social de estas, la Estrategia Nacional de Transición Socioecológica Justa (ENTSJ). Conceptualmente, la TSJ reconoce la codependencia entre sistemas energéticos, sociales y ecológicos (Fischer-Kowalski et al., 2012) y sus impactos territoriales (Heras & Gupta, 2024; Rabí et al., 2021). En contextos como el chileno, marcados por segregación social, fragmentación y desigualdad (Álvarez et al., 2019; Chirambo, 2020; Sapiains et al., 2021), esta mirada sistémica y ecológica ha sido priorizada por el Estado. En este contexto, la carbono neutralidad, implementada bajo una TSJ, supone reconvertir sectores intensivos en emisiones con empleo digno y capacitación, redistribuir territorialmente beneficios y cargas, reparar pasivos socioambientales, fortalecer capacidades regionales y municipales, y garantizar participación vinculante -incluidas comunidades indígenas, rurales y costeras- en decisiones y monitoreo. Así, la TSJ reduce emisiones y vulnerabilidades sin reproducir desigualdades.

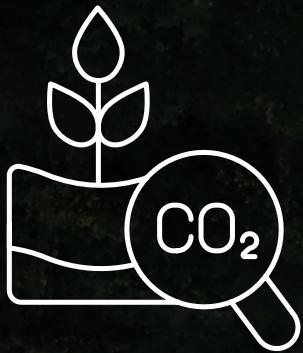
Si bien la TSJ es un desafío país y una urgencia territorial, su implementación en Chile es aún incipiente, especialmente con relación a carbono neutralidad. Las primeras acciones se materializaron en 2014 con la creación de los Programas para la Recuperación Ambiental y Social, concebidos como estrategia participativa y multisectorial para avanzar en la descarbonización de las zonas de sacrificio (Páñez-Pinto et al., 2023). No obstante, la falta de referencias sistemáticas y de indicadores ha dificultado su evaluación (Cisterna, 2022). Desde 2023 se han impulsado nuevos procesos políticos, aún no implementados, y nuevamente, sin indicadores que permitan monitorear avances hacia la carbono neutralidad y el DRC.

Considerando la falta de monitoreo, emergen desafíos clave para alinear la carbono neutralidad, la TSJ y el DRC en nuestro país: 1. Asegurar que las políticas nacionales se implementen con pertinencia territorial y participación efectiva de los territorios en transición, 2. Definir criterios transparentes para incorporar nuevos territorios que se autodenominan zonas de sacrificio, llamados institucionalmente como territorios en transición, 3. Prevenir la creación de nuevas zonas de sacrificio mediante evaluaciones *ex ante*, salvaguardas y planificación integrada, y 4. Establecer indicadores de proceso e impacto -sociales, ambientales y de gobernanza- que verifiquen que la trayectoria sea realmente justa y socioecológica. Abordar estos desafíos exige una colaboración efectiva entre Estado, academia, comunidades y sector privado.

Recuadro 10

Indicadores de transición socioecológica justa (Roxana Bórquez y Raúl O’Ryan)

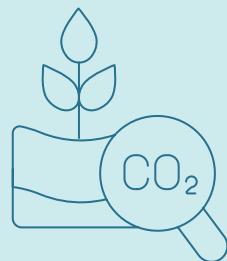
Para implementar políticas públicas orientadas a la carbono neutralidad y el DRC, es esencial contar con indicadores que permitan monitorear el avance hacia los objetivos y verificar la hipótesis de mejora asociada a cada medida. Estos indicadores no solo orientan la gestión y la asignación de recursos, sino que también fortalecen la transparencia y la legitimidad ante la ciudadanía. Frente a este escenario, desde el año 2021, el CR2 ha contribuido con un enfoque de gobernanza climática integrada que articula múltiples niveles de decisión, saberes técnicos y locales, y una diversidad de actores (Billi et al., 2021; Tábara, 2020). Este enfoque habilita el diseño de un monitoreo trazable del progreso hacia la carbono neutralidad y el DRC. En efecto, el CR2 está desarrollando indicadores de Gobernanza para la TSJ a nivel nacional y una metodología para que cada territorio pueda definir indicadores que son contextuales a sus realidades. Todo el trabajo se basa en seis dimensiones: 1. Bases para oportunidades económicas, 2. Desarrollo humano, 3. Resguardo ambiental, 4. Justicia climática, 5. Gobernanza democrática y 6. Buena administración. Este marco permite capturar la complejidad de los procesos y responde a las demandas territoriales, asegurando una trayectoria justa, efectiva y verificable hacia la carbono neutralidad y el DRC.



Sección 4:

Carbono neutralidad e inventarios en Chile

- Las principales fuentes de emisión de GEI de Chile provienen del sector energético y las principales capturas contabilizadas corresponden a las realizadas por bosque nativo y plantaciones forestales.
- Sin embargo, la ocurrencia de megaincendios ha provocado un cambio sustancial en el balance neto de GEI a nivel nacional. Por ejemplo, en el 2017, aunque las capturas se mantuvieron similares a años previos, la superficie afectada por incendios transformó al sector capturador en una fuente neta de emisiones.
- Pese a los esfuerzos de medición y registro de GEI, los inventarios tienen potencial de mejora, lo cual puede lograrse en un trabajo conjunto entre la academia, el sector público y privado.
- Las mejoras en los inventarios de las zonas costeras, océanos, suelos y reservorios pueden aportar no sólo a Chile, sino también a los inventarios de otros países.



Sección 4: Carbono neutralidad e inventarios en Chile

Esta sección presenta un panorama de los **inventarios de emisiones** disponibles en Chile, con énfasis en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). El INGEI lleva el registro que permite reportar el logro del compromiso de carbono neutralidad del país ante la Conferencia de las Partes (COP), dando cumplimiento al Acuerdo de París.

A partir del INGEI, se examinan las principales fuentes de emisión y de secuestro de carbono. El inventario de Chile es completo, consistente y de acuerdo a las metodologías recomendadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). No obstante, puede mejorar, especialmente en la precisión de las estimaciones de captura y en la inclusión de un registro del carbono almacenado en ecosistemas terrestres y en ecosistemas costeros y marinos. Esta sección hace un llamado a poner atención en la gobernanza de los datos climáticos y los desafíos para alcanzar las metas comprometidas.



Capítulo 16: Inventarios y reporte de la carbono neutralidad

Rocío Araya, Cecilia Ibarra, Mauricio Osses y Mauricio Galleguillos

En la actualidad, los inventarios de emisiones a nivel nacional, desarrollados en Chile y en América Latina, están orientados al reporte de gases de efecto invernadero (GEI), contabilizando tanto las emisiones a la atmósfera como las capturas anuales —consideradas emisiones negativas—. Chile cuenta, además, con inventarios de emisiones de contaminantes locales centrados en las megaciudades que permiten comprender las interacciones y los mecanismos de retroalimentación entre las emisiones, la calidad del aire y la salud pública (Alonso et al., 2010; Gallardo et al., 2012; Huneeus et al., 2020). Estas interacciones entre emisiones —tanto positivas como negativas— contabilizadas en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile (INGEI) y los inventarios de contaminantes locales son la base para diseñar y evaluar medidas que fomenten sinergias y cobeneficios, como los ejemplos mostrados en la sección anterior.

El INGEI elaborado por el Ministerio del Medio Ambiente en el año 2024, contabiliza las emisiones y capturas de GEI en Chile distribuidas en cinco sectores: 1. Energía, 2. Procesos Industriales y Uso de Productos, 3. Agricultura, 4. Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) y 5. Residuos. De estos, únicamente el sector UTCUTS reporta absorciones netas de CO₂, lo que lo consolida como el principal sumidero de carbono del país.

La elaboración de los inventarios en Chile está coordinada por el Sistema Nacional de Inventarios (SNICHILE). Este sistema integra a equipos técnicos sectoriales de los ministerios del Medio Ambiente, Agricultura y Energía, junto con la colaboración de instituciones como la Corporación Nacional Forestal (CONAF), la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y el Instituto Nacional Forestal (INFOR). Cada equipo sectorial compila la información necesaria —datos de actividad y factores de emisión— aplicando las metodologías del IPCC para realizar las estimaciones.

El INGEI considera al CO₂ como el gas de efecto invernadero más importante, por lo que los demás gases, de vida larga y media (más de diez años), considerados en este inventario se homologan según una tabla estandarizada de conversión, llevando la contabilidad de emisiones en una sola unidad: el **dióxido de carbono equivalente (CO₂eq)**.

El cálculo se basa en datos de actividad y factores de emisión. La actividad corresponde a la cantidad o extensión de una actividad que genera emisiones, por ejemplo, la cantidad de combustible consumido en transporte o el número de hectáreas de bosque. Los factores de emisión, también llamados coeficientes de emisión, son los valores que permiten convertir los datos de actividad en emisiones. Por ejemplo, el factor de emisión de un vehículo indicará la cantidad de CO₂eq emitida por litro de

combustible que consume ese vehículo. El factor de captura (emisión negativa) de un tipo particular de bosque indicará las capturas de CO₂eq por hectárea de ese bosque durante un periodo de tiempo, usualmente un año en los inventarios.

Los INGEI pueden presentar distintos niveles de especificidad en sus datos y metodologías. Según las directrices del IPCC, se distinguen tres niveles de cálculo de emisiones. El nivel 1 es el método básico, que consiste en utilizar datos de actividad agregados, obtenidos de fuentes internacionales, y factores de emisión genéricos proporcionados por el IPCC. Este nivel resulta relativamente más fácil y menos costoso de implementar, pero es menos preciso puesto que no es específico de las condiciones locales. En este nivel estaría, por ejemplo, el cálculo con un factor de emisión promedio global para la combustión de gasolina en el transporte.

El nivel 2 corresponde a un cálculo que utiliza datos de actividad sectoriales más detallados y específicos del país, así como factores de emisión adaptados a las condiciones nacionales, obtenidos a partir de estudios locales o de datos específicos del país. En este nivel estaría, por ejemplo, el uso de un factor de emisión para el combustible de gasolina en el país, basado en la calidad del combustible y la tecnología de los vehículos. Por último, el nivel 3 se basa en métodos y modelos específicos para las condiciones nacionales. Esto incluye resultados de mediciones directas realizadas en el país, a partir de estudios empíricos locales, y modelos detallados que utilizan datos específicos de cada sector. Un ejemplo es el uso de modelos de simulación del comportamiento de una planta industrial basados en datos de operación reales y mediciones directas. Este último nivel ofrece mayor precisión y relevancia en relación con las condiciones locales, pero requiere acceso a datos y a recursos técnicos y financieros para la investigación y la validación. La diferencia entre el nivel 2 y el nivel 3 radica en que en el último se llevan registros detallados de los niveles de actividad y sus factores de emisión, que se actualizan periódicamente y están disponibles en fuentes oficiales.

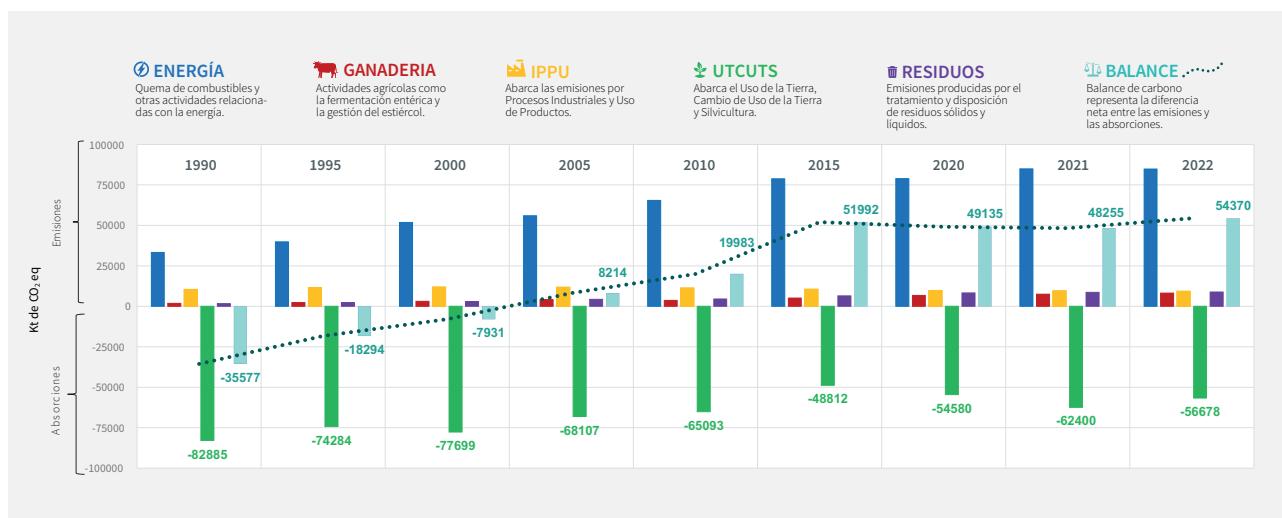
En el nivel 2, la información se reúne a partir de fuentes dispersas en algún estudio que no necesariamente tiene continuidad en el tiempo y debe conciliar diferencias metodológicas entre las distintas fuentes de información. Cuando no hay información disponible para elaborar inventarios de nivel 3, se elaboran de nivel 2. Si no existen estudios que permitan realizar los cálculos a nivel 2, el IPCC recomienda evaluar la importancia de la fuente emisora. Si se trata de una fuente emisora que representa un alto porcentaje de las emisiones del país, es decir, pertenece a una categoría principal, la recomendación es realizar los estudios necesarios para alcanzar el nivel 2.



El nivel 1 debiera usarse cuando no hay información y en casos de emisiones que no son estratégicas en el balance.

En Chile, los principales datos de actividad se obtienen de estadísticas y censos que no fueron diseñados para los inventarios, lo que exige la armonización de distintas bases de datos, la homologación con las clasificaciones y categorías definidas por el IPCC y la realización de interpolaciones para completar los vacíos de información y mantener la coherencia temporal y espacial. Si bien la mayoría de los factores de emisión corresponden a valores por defecto del IPCC, también se han desarrollado factores específicos al país basados en literatura científica, consultas a expertos y estudios técnicos orientados exclusivamente a generar factores de emisión ajustados a las condiciones nacionales, es decir, se usan niveles 1 y 2. El SNICHILE cuenta, además, con un Sistema de Garantía y Control de la Calidad para asegurar la transparencia, exhaustividad, coherencia, comparabilidad y exactitud de los inventarios y con un Sistema de Registro Tabular que facilita el acceso y la transparencia del INGEI de Chile.

El INGEI de Chile cubre el territorio nacional continental y reporta en los cinco sectores definidos por el IPCC. El GEI con mayor presencia es el dióxido de carbono (CO₂) y los sectores Energía, Procesos Industriales y Uso de Productos, Ganadería, y Residuos, concentran la mayor parte de las emisiones del país (Fig.16.1). El sector Energía, que incluye la producción de energía (térmica y eléctrica) y sus usos en transporte, industria, comercial y residencial, ha sido el principal emisor de GEI, representando entre un 70 % y 80 % del total nacional entre 1990 y 2022. En contraste, el sector UTCUTS constituye el principal sumidero de carbono del país, absorbiendo entre un 30 % y 50 % de las emisiones totales en el mismo periodo. Por lo tanto, los sectores de Energía y UTCUTS son clave para alcanzar el objetivo de carbono neutralidad, mediante medidas como el retiro gradual de centrales de carbón, el impulso de la electromovilidad, y el aumento de la superficie de bosques.





Capítulo 17: Emisiones de carbono en Chile

Mauricio Osses y Nicolás Huneeus

El sector Energía cuenta con factores de emisión país específicos para los principales combustibles líquidos derivados del petróleo y para el carbón, principal fuente de las emisiones en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, la mayor incertidumbre está asociada al uso de factores de emisión genéricos entregados por el IPCC. Con respecto a los datos de actividad (que corresponden al consumo de combustible), el inventario califica su incertidumbre como baja. No obstante, estos datos provienen del Balance Nacional de Energía (BNE), el cual no cuenta con una estadística sobre la exactitud e incertidumbre de los datos. Por tanto, no es posible conocer con claridad el grado de incertidumbre de esta información ni cómo afecta la estimación total del sector.

El SNICHILE se ha mantenido sistemáticamente desde 2012 e incluye estimaciones a partir de 1990 hasta la fecha (MMA, 2024). Si bien la calidad de los datos está asegurada por las metodologías utilizadas que siguen las directrices del IPCC, el nivel de agregación es nacional, siendo útil para monitorear los objetivos y obligaciones de Chile ante las Naciones Unidas, en particular el avance en la meta de carbono neutralidad. Sin embargo, el nivel nacional es demasiado agregado para tomar decisiones a nivel local (por ejemplo, en regiones y comunas).

A diferencia de los INGEI, los inventarios oficiales de contaminantes criterio (dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, monóxido de carbono, plomo y material particulado) asociados a la calidad del aire (por ejemplo, material particulado) incluyen solo unas pocas ciudades para ciertos años, principalmente dependiendo de si están sujetas a Planes de Prevención y Descontaminación Ambiental. Las metodologías empleadas en estos inven-

tarios no son consistentes y la incertidumbre de los datos es significativa, lo que dificulta la comparación entre años y ciudades. Por ejemplo, el estudio de Gallardo et al. (2012) sugiere que las emisiones de óxido de nitrógeno en Santiago en la época estudiada estaban sobreestimadas en tres veces su magnitud.

Aun así, Chile ha realizado esfuerzos para elaborar inventarios con base en estadísticas públicas para apoyar el proceso de gestión de la calidad del aire (Barraza et al., 2017). Uno de los contaminantes incluidos en los inventarios nacionales desde 2012 son los forzantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés), que corresponden a metano, carbono negro, ozono troposférico e hidrofluorocarbonos. Esta inclusión se concretó cuando el Ministerio del Medio Ambiente se unió a la Coalición Clima y Aire Limpio y se comprometió a reducir las emisiones de estos contaminantes. Una de las acciones emprendidas fue identificar las principales fuentes de los SLCP, concluyendo que el transporte era un sector de emisión principal y se proyectaba que esta tendencia continuaría en el mediano y largo plazo, y que las concentraciones de carbono negro seguirían siendo preocupantemente altas (Jorquera et al., 2017; Gallardo et al., 2020).

Recientemente se ha desarrollado el Inventario Nacional de Emisiones Antropogénicas (INEMA, ver Recuadro 13) para todo el territorio nacional, con emisiones de los sectores industrial, residencial y transporte, con alta resolución espacial para los años 2015-2018 (Alamos et al., 2021). En el caso del sector transporte, este mismo inventario se ha calculado para el período extendido entre 1990-2020 (Osses et al., 2022).

Recuadro 11

Carbono neutralidad y descarbonización (Mauricio Osses)

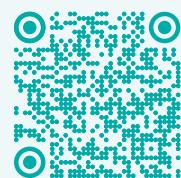
En los acuerdos internacionales y también en las políticas nacionales se han usado distintos términos asociados a estrategias para disminuir la concentración de GEI en la atmósfera, uno de los más comunes, usado en Chile antes de carbono neutralidad, es la descarbonización.

Descarbonizar se refiere a eliminar el consumo de combustibles fósiles que tienen carbono en su estructura molecular con el fin de reducir las emisiones de ese carbono a la atmósfera, por lo tanto, su foco es la mitigación.

¿Qué es la descarbonización?

Asesoria Científica: Laura Gallardo y Mauricio Osses
Edición: equipo Capsula Climática

Descarbonizar se refiere a eliminar el consumo de combustibles fósiles que tienen carbono en su estructura molecular con el fin de reducir las emisiones de ese carbono a la atmósfera. Muchos combustibles contienen carbono: leña, carbón, petróleo y gas, y son los más usados en Chile para la generación de electricidad, transporte, producción industrial, consumo residencial y comercial. El proceso que los transforma en energía produce, entre otros, emisiones de dióxido de carbono (CO₂), un gas de efecto invernadero causante de cambio climático asociado a las actividades humanas (antrópicas).





Recuadro 12

Observatorio de carbono neutralidad (Mauricio Osses)

Este observatorio académico del Centro de Energía de la Universidad de Chile y del CR2 da seguimiento independiente a los compromisos de emisiones de Chile. El Observatorio hace un monitoreo basado en fuentes oficiales, de manera complementaria al INGEI, e incluye análisis sectoriales y regionales.

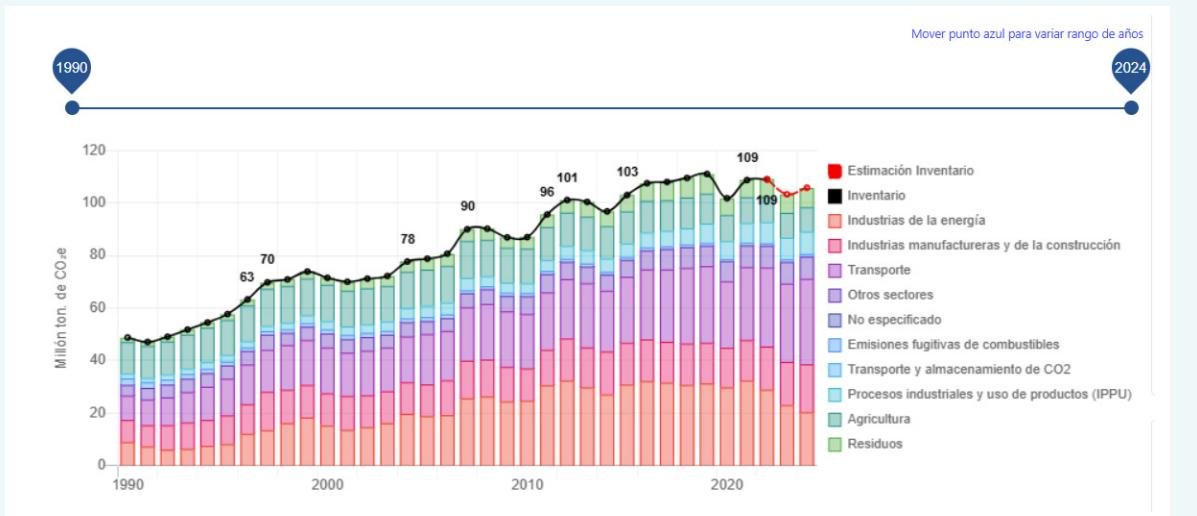
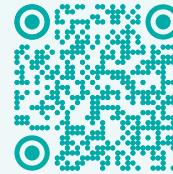


Figura 17.1: Observatorio de la carbono neutralidad en Chile

Las medidas propuestas por la NDC de Chile y su Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP), que se relacionan directamente con el sector transporte, son de carácter regulatorio y de fomento tecnológico, con taxis, vehículos comerciales y vehículos particulares eléctricos, además de transporte de carga con hidrógeno, cambio modal del transporte (por ejemplo de privado a público) y mejoras del transporte público a lo largo del país. Así, la meta de carbono neutralidad requiere una reducción de 65 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂eq) al año 2050, tomando como base el año 2015. Esto implica que la tasa de electrificación del sector transporte terrestre debiese pasar de 2 % el 2020 a 61 % el 2050, acompañada de un 94 % de generación eléctrica renovable al 2050 (Clerc, 2020).

La NDC de Chile del año 2020 estableció como meta mantener un nivel de emisiones inferior a 95 MtCO₂eq para el año 2030 y limitar las emisiones acumuladas entre 2020 y 2030 a un máximo de 1.100 MtCO₂eq. Adicionalmente, la actualización 2025 de la NDC compromete un presupuesto nacional de emisiones de GEI que no supere las 480 MtCO₂eq entre 2031 y 2035, y a no superar un nivel de emisiones de GEI de 90 MtCO₂eq en 2035. Según las proyecciones del escenario base, las medidas incluidas en los planes sectoriales de mitigación y adaptación actuales no serían suficientes para alcanzar estas metas de la NDC.

El sector transporte es, actualmente, la principal fuente de emisiones de GEI del país y seguirá siéndolo según las proyecciones para mediano y largo plazo. Por otro lado, las emisiones del sector de generación eléctrica han disminuido en los últimos años gracias a la incorporación masiva de energías renovables y al retiro gradual de las centrales a carbón. Mantener esta tendencia en el mediano y largo plazo es fundamental para cumplir con las metas de la NDC y alcanzar la carbono neutralidad. Sin embargo, las medidas de electromovilidad, junto con la electrificación de otros sectores, incrementarán significativamente la demanda eléctrica, ejerciendo presión sobre el sistema de generación eléctrica para incorporar más fuentes de energía renovable. Así, se proyecta que la participación de energías renovables en la matriz energética debería aumentar del actual 65-67 % a ser aproximadamente del 86 % para 2030 y del 90 % para 2035 para lograr las metas propuestas.

La leña no se considera entre las fuentes de energía, puesto que para las metodologías recomendadas por el IPCC es un combustible renovable. Sin embargo, Chile debe llevar una contabilidad del consumo de leña para dar cuenta de su meta de carbono negro. El volumen de cosecha de madera comercial y leña proviene de los anuarios forestales del INFOR.



Recuadro 13

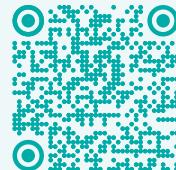
INEMA (Mauricio Osse y Nicolás Huneeus)

El Inventario Nacional de Emisiones Antropogénicas (INEMA) es el primer inventario nacional de emisiones humanas de alta resolución para Chile. En este, se estiman las emisiones de los sectores vehicular, industrial, energético, minero y residencial para el período 2005-2022, y se distribuyen espacialmente en una malla de alta resolución de, aproximadamente, un kilómetro por un kilómetro. Los contaminantes incluidos son dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, amoníaco y material particulado fino para todos los sectores. Se incluye también el radical metilo y el carbono negro para el transporte y las fuentes residenciales, mientras que se estiman arsénico, benceno, mercurio, plomo, tolueno y dibenzo-p-dioxinas policloradas y furanos para las fuentes energéticas, mineras e industriales. Se compilan datos de actividad y factores de emisión para estimar las emisiones que, posteriormente, se distribuyen espacialmente utilizando datos censales e información de la red vial de Chile.

Hay que señalar que en cada sección del país las fuentes de contaminantes son diferentes. Por ejemplo, en el norte de Chile están dominadas por las actividades mineras, así como por las centrales termoeléctricas, mientras que en Chile central y sur las fuentes dominantes son las emisiones del transporte y residenciales.

Este inventario respalda el diseño de políticas que buscan mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire (políticas con sinergias que logren cobeneficios), al proporcionar a los tomadores de decisiones, las partes interesadas y los científicos información cualificada y espacialmente explícita sobre las emisiones.

Los datos de INEMA se encuentran disponibles en la Plataforma de Emisiones de GEI Comunal.



Recuadro 14

Megaincendios y carbono neutralidad (Rocío Araya, René Garreaud y Mauro E. González)

Las tierras forestales pueden convertirse en fuentes emisoras de GEI, como sucedió en 2017 debido a los grandes incendios ocurridos en las regiones centro-sur de Chile que hicieron del sector UTCUTS un emisor neto en el balance de ese año.

Estas regiones están experimentando un cambio en el régimen de incendios caracterizado, entre otros elementos, por la ocurrencia cada vez más frecuente de megaincendios forestales que en pocos días consumen cientos de miles de hectáreas (Bowman et al., 2018; Urrutia et al., 2018; González et al., 2020; González et al., 2022; González et al., 2024; Jacques et al., 2023). Históricamente, el área quemada promedio en Chile alcanzaba las 54.000 hectáreas anuales, mayormente en la zona centro-sur del país (González et al., 2020). A partir del año 2010 esta situación comenzó a cambiar, coincidentemente con el inicio de la megasequía en Chile central (Garreaud et al., 2017, 2019), constatándose una extensión de la temporada de incendios, una mayor simultaneidad y duración de los eventos, y un aumento de su tamaño (González et al., 2018).

Bajo un escenario de condiciones meteorológicas extremas (olas de calor, baja humedad y fuertes vientos) ocurrió a fines de enero del 2017 el megaincendio de Las Máquinas, en la región del Maule, que consumió vorazmente más de 160.000 hectáreas en tan solo una semana, convirtiéndose en el mayor incendio forestal registrado en Chile (Lara et al., 2023; CONAF, 2023) y elevando el área quemada esa temporada a 570 mil hectáreas, 10 veces el promedio histórico a la fecha.

Junto con el daño socioambiental, estos eventos provocan una perturbación sustancial en el balance neto de GEI a nivel nacional. El INGEI de Chile considera todas las emisiones de incendios forestales como de origen antrópico y las contabiliza en el sector UTCUTS, el único con capturas en la serie temporal. Sin embargo, en años críticos como 2017, las emisiones por incendios forestales revirtieron esta tendencia. El balance neto del sector UTCUTS se calcula como la diferencia entre ganancias (capturas) y pérdidas (emisiones) de carbono en la biomasa, ambas determinadas por la superficie fores-

tal (bosque nativo y plantaciones forestales). En 2017, aunque las capturas se mantuvieron similares a años previos, la superficie afectada por incendios fue mayor que la superficie efectiva que aporta a las capturas, transformando al sector de capturador neto a una fuente neta de emisiones. Estas estimaciones siguen los supuestos del IPCC, por lo que se asume que todo el carbono de la biomasa se libera en el año del incendio. En Chile, la superficie afectada se obtiene de los registros de la Gerencia de Manejo del Fuego de CONAF. Para plantaciones forestales se utilizan factores de emisiones específicos, como la combustión de la biomasa desarrollados para *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*, mientras que para bosque nativo se aplica un factor único establecido por criterio de expertos. Sin embargo, para comprender cómo los incendios forestales afectan las emisiones en Chile, es necesario considerar los efectos de su frecuencia, extensión y severidad, así como la recuperación de la vegetación y suelos pos-incendio en el ciclo del carbono.



Capítulo 18: Capturas

Rocío Araya, Jorge Herrera y Mauricio Galleguillos

La ganancia en capturas del sector UTCUTS se explica principalmente por el incremento de biomasa en tierras forestales y por la conversión de otras tierras hacia cobertura forestal, mientras que las pérdidas se relacionan con la disminución de biomasa o el cambio de uso del suelo. Así, en 2022, el balance de GEI del sector UTCUTS reportó capturas (emisiones negativas) contabilizadas en -56.678,8 kilotoneladas de CO₂ equivalente (kt CO₂eq), mostrando un alza de un 3,8 % desde 2020. La categoría de tierras forestales se mantiene como la más importante del sector, aunque ha registrado una disminución de sus capturas desde 1990, lo que se explica, principalmente, por una menor conversión de otras tierras a tierras forestales y por un aumento de los incendios.

Las tierras se clasifican en forestales, de cultivo, asentamientos, pastizales y humedales. En el sector UTCUTS, las estimaciones solo incluyen aquellas atribuibles a tierras gestionadas, considerándose aquellas superficies correspondientes a plantaciones forestales (según el Programa de Actualización Permanente de Plantaciones Forestales en Anuario Forestal de INFOR), el bosque nativo con plan de manejo (según el Sistema de Actualización y Fiscalización Forestal de CONAF), y el bosque nativo en reservas y parques nacionales (según el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, SNASPE, del Ministerio de Bienes Nacionales) es decir, tierras bajo intervención humana. Según el INGEI (2024) las tierras forestales gestionadas representan en promedio el 63 % de todas las tierras forestales del país entre 1990 y 2022, esto incluye a las plantaciones forestales, bosque nativo con plan de manejo, bosque nativo que está en áreas de conservación, bosque nativo de **renovales** (bosques de segundo crecimiento), el bosque nativo que se origina debido al cambio de uso de la tierra y del cambio de cobertura vegetacional desde plantaciones forestales y bosques mixtos.

Para la contabilización de bosque nativo, se considera la superficie de bosque nativo manejado (con plan de manejo aprobado). También se consideran, por un lado, los bosques de segundo crecimiento (renovales y adultos renovales) de áreas privadas y del sistema de áreas protegidas del Estado, y, por otro lado, todos los demás bosques presentes en las áreas protegidas dentro del SNASPE. Finalmente, también se consideran las superficies donde se produce un cambio de uso de suelo hacia bosque nativo. En las categorías tierras de cultivo y asentamientos, toda la superficie se considera bajo gestión. Cabe destacar que en la categoría de humedales, solo se contabilizan las emisiones de GEI asociadas a tierras convertidas en reservorios o embalses, ya que no se dispone de información sobre la superficie de turberas y humedales costeros.

Como se dijo anteriormente, las tierras forestales representan la mayor proporción de las capturas, principalmente mediante el secuestro de carbono en la biomasa aérea (madera de troncos y ramas gruesas, hojas, ramillas, corteza y raíces). En menor medida, los productos de la madera recolectada también han contribuido a las absorciones netas nacionales, ya que almacenan carbono durante su vida útil y se contabilizan desde el INGEI 2024. En contraste, el resto de los usos de la tierra constituye fuentes de emisión, principalmente debido a cambios de uso de la tierra.

Para la cuantificación espacial, primero se integran datos satelitales y el Catastro de Recursos Vegetacionales para detectar cambios de uso de la tierra y así clasificar áreas en tierras forestales que permanecen como tales, tierras convertidas a forestales y tierras forestales transformadas a otros usos. En estas áreas se diferencian los depósitos de carbono en biomasa aérea, carbono del suelo y materia orgánica muerta, calculando las emisiones y absorciones de CO₂ y las emisiones de metano y óxido nítrico. Las capturas se estiman en función de la superficie y diversos factores que son proporcionados por el INFOR para tipos de bosque nativo y plantaciones (métodos Nivel 2), mientras que para otras categorías de uso de suelo se recurre a valores por defecto establecidos por el IPCC (Nivel 1). El mayor grado de incertidumbre en este sector está asociado a la falta de una distinción clara entre tierras gestionadas y no gestionadas en las categorías de pastizales y humedales y en el uso de indicadores de Nivel 1 para otras categorías de uso de suelo. Chile no cuenta con estimaciones concretas de carbono en el suelo, y para su estimación en el INGEI se asume que está en equilibrio, de acuerdo con las directrices de nivel 1 del IPCC 2006.

En cuanto a factores de captura en bosque, se utiliza el incremento anual periódico, el cual está asociado al crecimiento de los árboles según su tamaño; en tanto para determinar la biomasa área y la materia orgánica muerta, se considera solo cuando hay cambio de uso de suelo. La principal fuente de información es el Inventario Nacional Forestal y diversas publicaciones científicas, siendo los trabajos de Gayoso et al. (2002) los más relevantes. Estos factores se diferencian, en primera instancia, según el tipo de bosque, ya sea plantación o nativo, y luego se diferencian por tipo forestal y por la clase diamétrica (rango en que se clasifica el diámetro) de los árboles presentes. Para el resto de las categorías de uso de la tierra se emplean factores de emisión por defecto del IPCC para todos los depósitos de carbono, lo que representa una gran fuente de incertidumbre del sector.



Reducir la incertidumbre requiere generar información específica del país, destacándose la necesidad de contar con información sobre los bosques no contabilizados y sobre el funcionamiento de los depósitos de carbono orgánico del suelo y también incorporando los humedales y turberas a los inventarios nacionales.

En el cálculo deben incluirse los incendios como fuentes emisoras. La superficie afectada anualmente por incendios forestales se obtiene de la Gerencia de Manejo del Fuego de CONAF. Se cuenta con factores de emisión específicos para incendios en plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*, obtenidos a partir de consultas directas a empresas asociadas a la Corporación Chilena de la Madera (CORMA) y validados en talleres con expertos en incendios forestales. En el caso de incendios en bosque nativo, se utilizan factores de emisión elaborados mediante juicio de expertos.



Capítulo 19: Captura y contabilización de océanos y carbono azul en Chile

Laura Farías y Rocío Araya

En Chile, la exclusión del océano de los INGEI también se relaciona con la escasa sistematización de datos, la alta vulnerabilidad de las zonas costeras afectadas por diversas problemáticas socioambientales y sujetas a un alto crecimiento industrial, turístico y excesiva urbanización, sumado a la extracción para fines comerciales y uso intensivo de los comunes marinos (Barragán & de Andrés, 2016; Boretto et al., 2018). Además de todos los impactos antrópicos en donde los bienes comunes costeros marinos son sobreexplotados, no existe una planificación ni protección frente al avance del cambio climático (aumento del nivel del mar y de la temperatura superficial del océano, mayor frecuencia e intensidad de marejadas, entre otros), factores que pueden aumentar la vulnerabilidad y conflictividades de estas zonas (IPCC, 2021; IPCC, 2022).

Sin embargo, Chile tiene una ventaja estratégica: posee una de las zonas económicas exclusivas más extensas del planeta, con aproximadamente 3.681.989 km², lo que equivale a más de 4,5 veces su territorio continental. A esto se suma una red única de ecosistemas marinos, que incluye sistemas de surgencia altamente productivos, fiordos subantárticos, islas oceánicas con alto endemismo (como Rapa Nui y el Archipiélago de Juan Fernández), y una larga plataforma continental en su zona austral, recientemente ampliada mediante una reclamación formal ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental. Chile también cuenta con una capacidad técnica y científica marina creciente (CONA, 2020), por lo que incluir el océano en sus balances climáticos sería no solo posible, sino que también representaría una acción visionaria en términos de liderazgo climático y coherencia ecosistémica. Nuestra acción climática se vería así favorecida si Chile considerara las emisiones y capturas marinas.

Las oportunidades más evidentes para el desarrollo del carbono azul en el país se encuentran en los bosques de macroalgas y marismas. El carbono en estos ecosistemas se almacena tanto en la biomasa como en los sedimentos adyacentes. Sin embargo, para avanzar en su integración, tanto en el INGEI, como en las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, es fundamental establecer un sistema de monitoreo continuo mediante metodologías replicables en todo el país. Asimismo, se requieren estudios que cuantifiquen su capacidad de secuestro de carbono, evalúen cómo las perturbaciones afectan sus emisiones y analicen los múltiples servicios ecosistémicos que proveen.

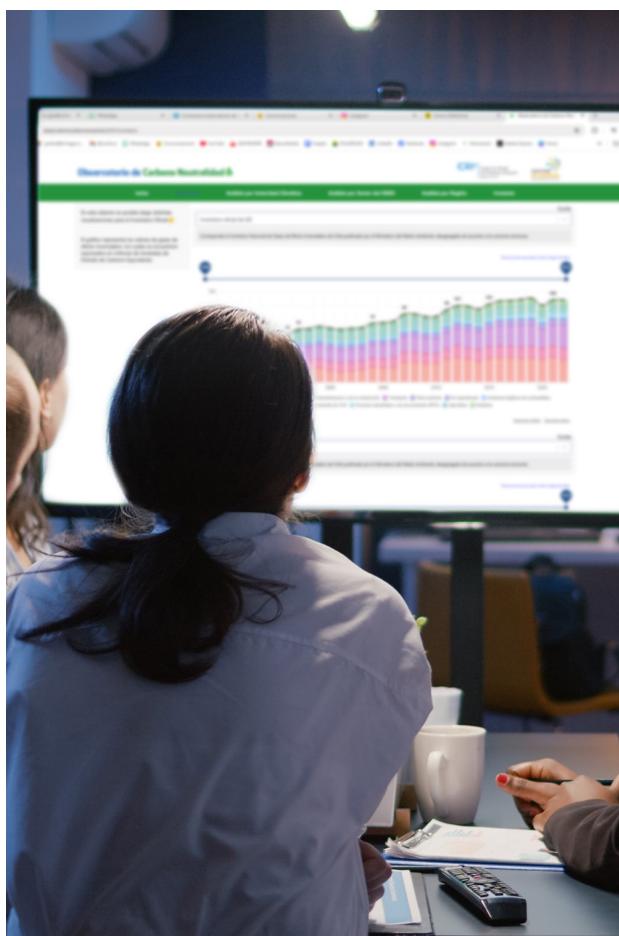


Capítulo 20: Desafíos de la gobernanza de datos climáticos para la carbono neutralidad en Chile

Francisca Muñoz

Como se vio en los capítulos anteriores, persisten desafíos importantes relacionados con la gobernanza y gestión de los datos climáticos necesarios para sustentar los compromisos climáticos, entre ellos la carbono neutralidad. Actualmente, estos datos se encuentran fragmentados entre múltiples instituciones públicas, con brechas significativas en interoperabilidad, trazabilidad y accesibilidad (Billi et al., 2021).

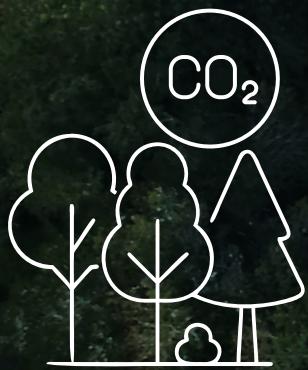
Un primer desafío relevante es la coordinación interinstitucional. Diversos organismos generan datos críticos para evaluar emisiones, captura de carbono y proyecciones sectoriales (energía, transporte, bosques, uso del suelo) sin lineamientos metodológicos homogéneos ni mandatos claros para su intercambio oportuno. Esta fragmentación institucional dificulta la construcción de líneas base y proyecciones comunes, compromete la implementación coordinada de medidas de mitigación y adaptación y limita la capacidad de identificar cobeneficios en salud, empleo o equidad territorial asociados a las transiciones sectoriales (Simon et al., 2023; Bórquez et al., 2024).



El segundo desafío se centra en la infraestructura digital y las capacidades especializadas. Aunque la agenda del Gobierno Digital contempla iniciativas como la Ley de Transformación Digital (Ley 21.180) y la Estrategia de Gobierno Digital 2030, estas acciones aún transcurren en paralelo y sin integración con la agenda climática. Por ejemplo, los planes sectoriales de adaptación y mitigación climática no consideran de manera transversal ni sistemática la gestión integrada de datos, la interoperabilidad ni las necesidades específicas de la agenda climática. Adicionalmente, aunque la Estrategia de Empoderamiento Climático plantea fortalecer capacidades técnicas en datos climáticos, aún falta alinear estos esfuerzos con la capacitación contemplada en la agenda digital, generando brechas en competencias técnicas y en la aplicación efectiva de estándares comunes para la gobernanza de datos climáticos (Engvall y Flak, 2022; BID, 2024; Muñoz, 2025).

Un tercer desafío es asegurar la trazabilidad y verificación sistemática de los compromisos climáticos adoptados por el país. Actualmente, los inventarios nacionales y las metas sectoriales —como el retiro del carbón, la electromovilidad o el fortalecimiento de sumideros— se desarrollan con criterios metodológicos, escalas temporales y formatos disímiles. Esta falta de lineamientos comunes dificulta la integración de información, el seguimiento coherente entre sectores y la identificación de desviaciones respecto a las trayectorias esperadas. Además, persisten vacíos en la definición de escenarios base y trayectorias cuantificadas en áreas clave, como justamente la captura de carbono, limitando la evaluación objetiva de avances y el cumplimiento de las NDC (Vaidula & Hood, 2018; Ibarra & Orellana, 2025; Muñoz, 2025).

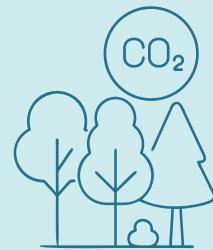
La superación de estas brechas mediante un marco coordinado no solo asegura una gobernanza climática efectiva, sino que también genera cobeneficios en la transparencia institucional, la participación ciudadana y la calidad de las decisiones públicas. Así, Chile estará mejor preparado para responder a los compromisos internacionales y nacionales en el camino hacia la carbono neutralidad, tanto en el cumplimiento de esta meta como en los impactos desde la perspectiva del desarrollo resiliente al clima.



Sección 5:

Desafíos científicos en la estimación del carbono en bosques

- La cuantificación de los reservorios y flujos de carbono en los bosques no está plenamente representada en los INGEI. No obstante, existen alternativas metodológicas para sopesar este vacío, lo que puede ser logrado con un enfoque basado en ciencia y tecnología, integrando organismos públicos y privados.
- La proyección de cómo podrían ser las emisiones y los reservorios de los ecosistemas bajo escenarios de cambio climático no se considera actualmente. El uso de herramientas de modelación permite visualizar y evaluar escenarios futuros, que constituyen la base para una planificación efectiva de las acciones climáticas.



Sección 5: Desafíos científicos en la estimación del carbono en bosques

Vimos que el sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) es el más relevante para contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que producimos como sociedad, dadas las grandes magnitudes de captura y secuestro que genera la vegetación. Efectivamente, los mecanismos naturales, vinculados principalmente a la fotosíntesis, requieren la captura de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, lo que termina generando un secuestro cuando la captura se traslada a la madera, las hojas y las ramas de los árboles, así como al suelo circundante.

Chile tiene un sistema de inventario de emisiones de carbono de buena calidad, que cumple con los estándares internacionales del IPCC, lo que le permite obtener estimaciones de nivel 2 (ver sección 4). No obstante, persiste una incertidumbre propia de la complejidad del sector UTCUTS. De particular interés son los bosques nativos al ser los principales agentes de secuestro de CO₂ a escala nacional. En efecto, el secuestro de CO₂ por parte de estos bosques depende de múltiples factores, tales como su estado de desarrollo, el tipo forestal al que pertenecen, así como aspectos climáticos, topográficos y de sus suelos, y de su interacción (ver sección 2), lo cual dificulta el monitoreo y su posterior generalización a escala del territorio.

Así, esta sección aborda diferentes alcances de las estimaciones de captura y de secuestro de carbono en los ecosistemas, con especial énfasis en los bosques nativos, y presenta desafíos metodológicos y científicos.



Capítulo 21: Secuestro de carbono de los bosques de Chile

Mauricio Galleguillos, Daniel Núñez y Jorge Herrera

Los bosques de Chile presentan una elevada riqueza, pues albergan diversas especies de árboles. Estos presentan diferencias marcadas en su funcionamiento (como tasas de fotosíntesis distintas o su capacidad de tolerar el estrés hídrico), lo que repercute en su capacidad de captura. El secuestro de carbono nacional no está actualmente detallado de manera espacialmente explícita, lo que implica que no hay cartografías disponibles que describan con precisión qué zonas capturan más o menos. Por lo tanto, inferimos esta información a partir del Catálogo de Bosque Nativo y Vegetación de CONAF, que mapea los tipos forestales presentes en Chile, y la ecuación descrita en el INGEI (MMA, 2024), que se basa en estimar el

cambio anual de las existencias de biomasa por tipo de bosque. De esta manera se elaboró un mapa detallado que muestra el potencial de secuestro de carbono por unidad de superficie en la zona del país donde se concentra la mayoría de los bosques, entre las regiones de Valparaíso y Magallanes (Figura 21.1).

Se observa una gran variabilidad en las capturas de carbono a lo largo del territorio nacional, tanto en términos absolutos (millones de toneladas totales por tipo forestal) como por unidad de superficie (toneladas por hectárea por año) (Figura 21.1).

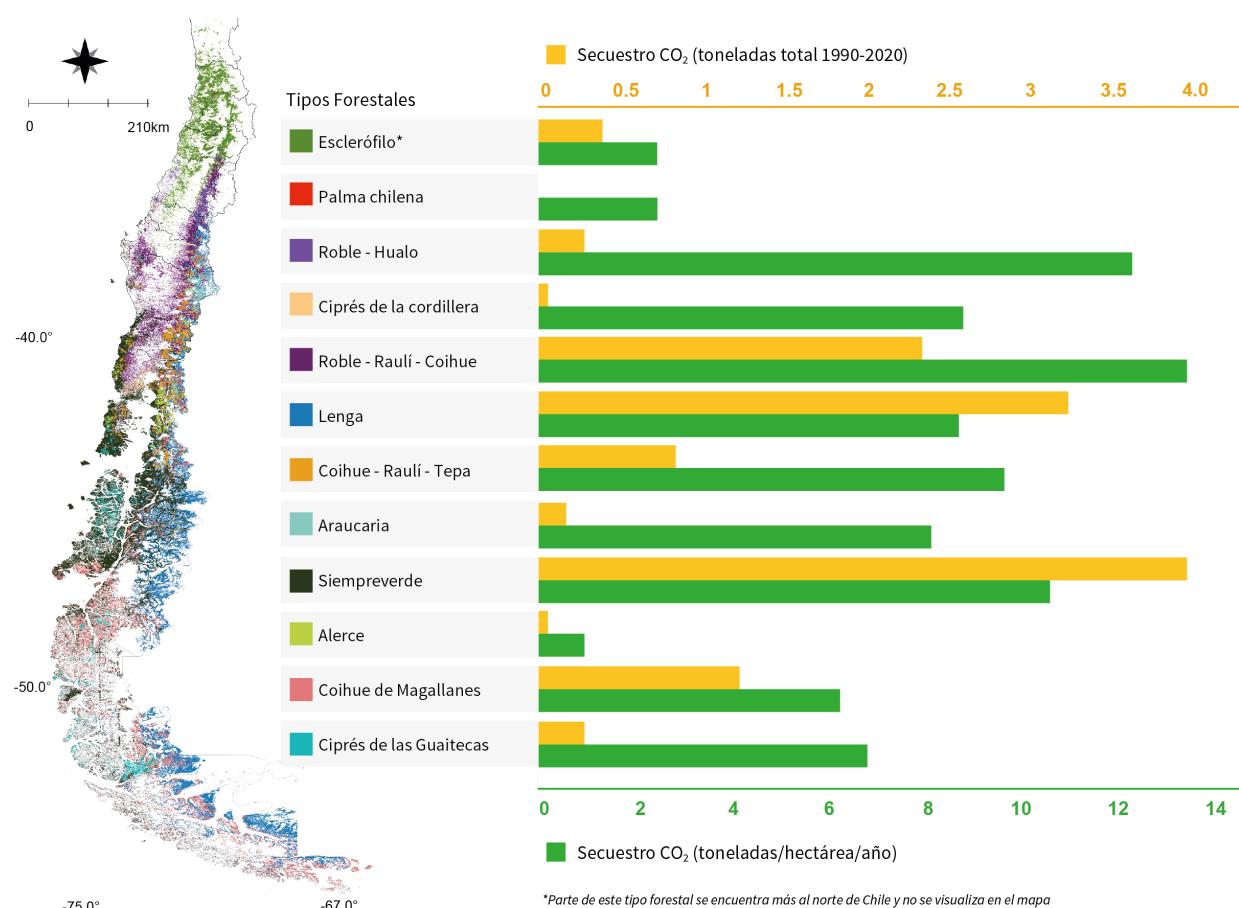


Figura 21.1: Existencias de carbono total y tasas anuales de captura potencial de CO₂ para los principales tipos forestales en Chile, según los lineamientos metodológicos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). El mapa muestra la distribución espacial de los tipos forestales a lo largo del territorio nacional, mientras que el gráfico de barras presenta el secuestro total de carbono por año para toda la superficie del tipo de bosque (amarillo, en toneladas totales) y la tasa de captura anual por unidad de superficie (verde, en toneladas por hectárea por año). Los valores reflejan la heterogeneidad entre ecosistemas forestales, destacando a los bosques siempreverde y lenga como los principales sumideros en términos absolutos, y a los bosques roble-raulí-coihue y roble-hualo por su alta captura anual por hectárea. Fuente: MMA (2023).



Destacan los extensos bosques del tipo forestal siempreviva y lenga, los cuales tienen el mayor **reservorio aéreo** total de carbono a escala nacional, con valores entre 3.3 y 4 kilotoneladas (kton) de carbono por año. Sin embargo, cuando analizamos la capacidad de captura por hectárea, los bosques roble-raulí-coihue (Ro-Ra-Co) y roble-hualo (Ro-Hua) sobresalen al registrar tasas de secuestro superiores a 12 toneladas por hectárea y por año. Al observar el mapa, surgen ciertas dudas, como el alto potencial de captura anual del ciprés de la cordillera y de la araucaria, pues se sabe que son especies de crecimiento lento, lo que señala la necesidad de avanzar hacia estimaciones más precisas de los distintos tipos de bosque.

El rápido crecimiento de los tipos Ro-Ra-Co y Ro-Hua representa tanto una oportunidad como un desafío para la implementación de estrategias de mitigación climática, ya que estos bosques se encuentran contiguos e históricamente conectados con la población rural, y la distribución del bosque de hualo es muy restringida. La cercanía a la población facilita la operación y el monitoreo para llevar a cabo acciones de **forestación** efectivas. Sin embargo, se debe considerar que estos bosques han sido explotados de manera permanente para diversos fines y se encuentran en zonas de alta recurrencia de incendios. Además, estos bosques se encuentran amenazados por el cambio climático, que provoca un clima más seco y caluroso. Así, las sequías generan respuestas diferentes en su crecimiento y, por ende, en la captura de CO₂. En el caso del roble, su respuesta a la sequía varía según la zona en la que se encuentre: es poco resistente a las sequías en la zona norte, pero muy resiliente, lo cual ocurre de manera inversa a medida que esta especie avanza hacia el sur (ver capítulo 10). Estas consideraciones complejizan la elección de especies forestales y su posible ubicación en cuanto a forestaciones, como se discute en el Recuadro 15.

Con estos antecedentes, otros bosques de importancia en superficie, tales como los siemprevivos o de lenga, localizados en zonas menos expuestas a las sequías e incendios, y donde además habitan menos personas, podrían representar una alternativa más confiable para la forestación. Esta acción, sin embargo, requiere mayores esfuerzos de monitoreo e investigación para garantizar su efectividad a mediano y largo plazo.





Recuadro 15

¿Dónde podrían ubicarse las forestaciones para cumplir con la NDC? (Jorge Herrera y Mauricio Galleguillos)

Chile tiene como meta forestar 200.000 hectáreas para cumplir con su NDC; no obstante, hay poca claridad sobre dónde podrían ubicarse estas forestaciones, dados los diferentes alcances metodológicos aún no resueltos. La implementación de métodos de simulación espacial ha permitido identificar áreas potenciales de forestación al integrar diversos factores territoriales. Con estos modelos se ha determinado que resulta complejo lograr la meta de forestación, incluso pagando incentivos para la plantación de nuevos bosques capaces de maximizar la captura de carbono (Ver Recuadro 19 en la Sección 6). De hecho, la aplicación de un incentivo para forestar puede ser efectiva para aumentar la superficie de bosques, pero no significativa para el cumplimiento de la actual meta nacional.

En el panel c) de la Figura 21.2 se observa que el mayor aumento de superficie forestada se produce en las regiones situadas más al norte del área de estudio (p. ej. la región de O'Higgins), a costa de una disminución en las regiones más sureñas (p. ej., la región del Biobío). Esto se explica, principalmente, por la tasa de secuestro de carbono, que es mayor en las especies que predominan en esa región y por la extensa presencia de matorrales en estas zonas, considerados los principales candidatos para ser reemplazados en la estrategia nacional. Pero el aumento en la superficie a forestar plantea una nueva preocupación: los incentivos podrían reubicar una parte

importante de la forestación hacia cuencas con estrés hídrico medio-alto, donde el aumento proyectado de la superficie de bosques alcanzaría alrededor de más de un 263 % (Herrera, O'Ryan & Galleguillos, 2025). Esta zona ha presentado un alto nivel de estrés hídrico (Boisier et al., 2024), por lo tanto, esta forestación podría significar un mayor consumo de agua en estas superficies dada la mayor cantidad de biomasa a generar, lo que podría traer consecuencias negativas en la provisión de agua de estos territorios, particularmente en momentos de escasez hídrica (Alvarez-Garretón et al., 2023).

En conclusión, los incentivos sí pueden acelerar la forestación, pero la planificación espacial resulta crucial. Para que la meta de carbono no comprometa otros servicios ecosistémicos, las políticas deberían priorizar cuencas con bajo estrés hídrico, favorecer la restauración con bosque nativo y promover diseños de baja huella hídrica (densidades moderadas y mezclas de especies nativas). Además, conviene incorporar explícitamente la incertidumbre en la planificación, mediante múltiples simulaciones y rangos de resultados, y acompañar la implementación con monitoreo. En resumen, para alcanzar la carbono neutralidad sostenible, Chile debe decidir no sólo cuánto plantar, sino también dónde, cómo y con qué especies hacerlo.

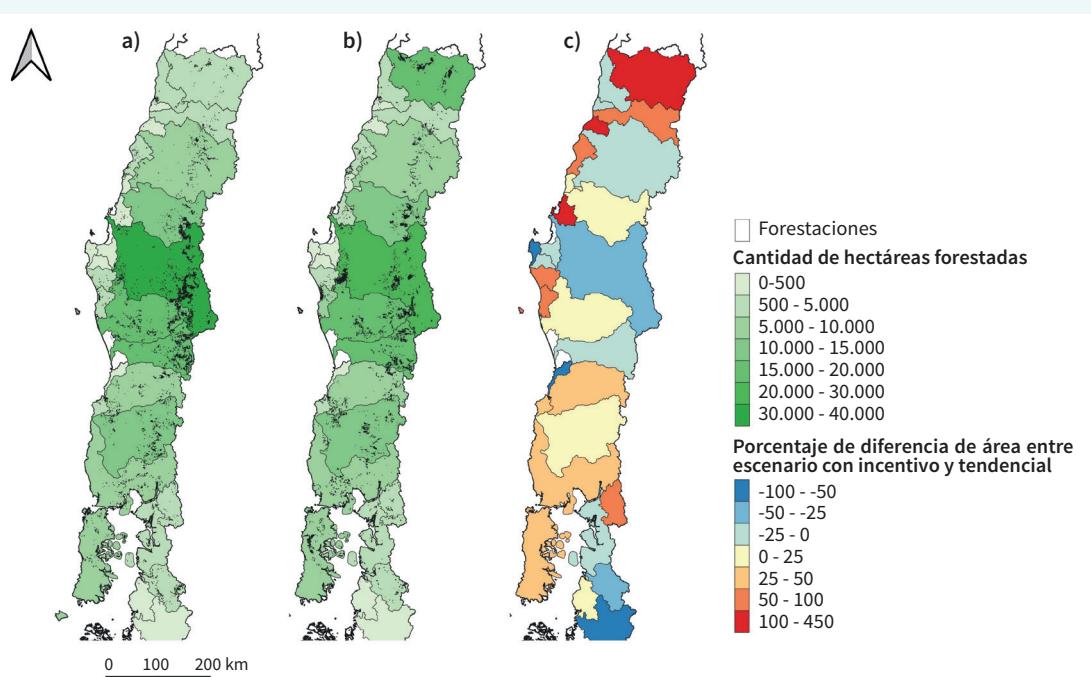


Figura 21.2: Distribución espacial de la forestación de bosque nativo (en negro) por cuenca hidrográfica. Los paneles (a) y (b) muestran parches de bosque nativo que representan la forestación, cuyo tamaño mínimo es de 5 hectáreas de acuerdo con las restricciones legales. El panel (a) muestra los del escenario de tendencia de cambio de uso de suelo, siguiendo la dinámica actual; el panel (b) muestra los parches de bosque nativo para el escenario de incentivos. El panel (c) muestra la diferencia porcentual en la superficie total forestada entre el escenario de incentivos y el de tendencia actual, con respecto a la (a).



Capítulo 22: Alcances de las estimaciones de capturas y secuestro de carbono de nuestros bosques

Mauricio Galleguillos, Jorge Herrera, Daniel Núñez y Jorge Pérez-Quezada

Chile basa su contabilidad de capturas de carbono en un sistema de inventario que cumple con todas las recomendaciones del IPCC. El inventario contiene una importante base de información biofísica plasmada en el Inventario Forestal Nacional (IFN) ejecutado por el Instituto Nacional Forestal (INFOR), de manera sistemática y repetida en el tiempo. Este monitoreo se realiza en terreno en los distintos tipos de bosques chilenos, de los cuales se obtienen valores de referencia para estimar las tasas de crecimiento de las distintas especies de árboles (Sagardia et al., 2024). Este sistema de inventario representa un gran esfuerzo de monitoreo al abarcar muchos de los diversos bosques de Chile; sin embargo, presenta limitaciones. En efecto, al revisar la representatividad en términos de toneladas de carbono de los bosques monitoreados, se evidencian vacíos de información respecto de muchos tipos y edades de bosque que no se consideran, pero que sí han sido estudiados por la comunidad científica (Recuadro 16). Esto podría ser relevante, ya que la exclusión de dichos bosques podría sesgar la estimación de la capacidad de captura de carbono, especialmente si no se incorporan sectores con bosques adultos que presentan dinámicas de captura de carbono distintas.

A esta problemática se suman debilidades en la representatividad espacial de nuestros bosques por parte del sistema de monitoreo nacional. Por un lado, el catastro de bosque nativo elaborado por CONAF, principal herramienta de la cartografía forestal, clasifica los ecosistemas según definiciones derivadas del Decreto Supremo N° 259 (Reglamento del Decreto Ley 701 de Fomento Forestal de 1980). Estas establecen criterios legales para la clasificación de bosques y sus variantes, donde, por ejemplo, un bosque puede categorizarse como tipo araucaria o alerce aun cuando cuente con un solo individuo de estas especies, lo que dificulta la representación de la realidad ecológica y genera incertidumbre al extrapolar dicha clasificación espacialmente. Estas limitaciones no solo se expresan en la clasificación, sino también en la estimación del cálculo de las superficies de bosques (Miranda et al., 2018). En estos cálculos se han reportado inconsistencias metodológicas, entre las que destacan las modificaciones en las actualizaciones de los catastros, las cuales no han reevaluado la exactitud de los resultados. En el contexto de la carbono neutralidad, asignar un factor de captura no representativo a los tipos de bosques puede ser aún más relevante, ya que puede conducir a sobreestimaciones o subestimaciones de las capturas reales de carbono de ciertos bosques, al tratar de aplicar un factor a otras zonas geográficas, como si todos los bosques fueran iguales, cuando en realidad no lo son, lo que termina afectando la adecuada contabilización de los sumideros en los reportes nacionales. Finalmente, la información geoespacial de las zonas monitoreadas oficiales es limitada en comparación con la superficie real de bosques considerada en las NDC, que es de 17,7 millones de hectáreas para todo Chile (Sagardia et al., 2024).

Recuadro 16

Incertidumbre en los datos del inventario de carbono almacenado en la biomasa aérea de los bosques chilenos (Magdalena Corona, Mauricio Galleguillos y Álvaro Gutiérrez)

La cuantificación del carbono almacenado en la biomasa de los bosques chilenos constituye un suministro clave para el reporte del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). El Inventario Forestal Nacional (IFN) es actualmente el único insumo para esta cuantificación a nivel forestal, por lo que la representatividad de las zonas muestreadas condiciona la precisión de las estimaciones de carbono y, por lo tanto, la confiabilidad del reporte hacia la carbono neutralidad.

Pese al importante esfuerzo de muestreo realizado por el Estado, de acuerdo con datos levantados por la comunidad científica entre 2000 y 2025, se observan diferencias entre los datos de biomasa medida del IFN y los de la comunidad científica, según su estructura forestal (CONAF, 2021). Esta diferencia se hace más evidente en bosques con alta biomasa o adultos, donde la mediana de las observaciones científicas es del orden de 250 toneladas de carbono por hectárea (ton C/ha) y con valores máximos por sobre las 600 ton C/ha, mientras que la de INF es solo del orden de 100 ton C/ha con máximos no mayores de 300 ton C/ha.

Por otro lado, las distribuciones de biomasa registran una media significativamente menor para el IFN que para el resto de las observaciones, tanto en bosques adultos, adultos-renovales, como en renovales. Esta discrepancia concuerda con otros estudios que indican que el IFN no refleja plenamente la variabilidad del bosque, subrepresentando zonas de alta densidad, principalmente en bosques primarios y maduros. Esto probablemente afecta los valores de tasa de captura registrados y los valores de los reservorios de carbono, ya que los bosques adultos tienden a presentar tasas de captura menores de acuerdo con su fisiología (Pascual et al., 2024). Para reducir la incertidumbre, se vuelve necesario complementar el IFN con otros muestreos tales como los que maneja CONAF o la comunidad científica.



Las estimaciones de los flujos de captura y emisión presentan desafíos metodológicos aún no resueltos, debido a la complejidad del funcionamiento de los ecosistemas y las extensas áreas que abarcan estas superficies, especialmente las cubiertas por bosques. Esta complejidad introduce un nivel significativo de posibles errores en los balances de carbono, los cuales constituyen la base para el reporte, diseño y evaluación de la política pública. Esta situación no solo debilita la base de la toma de decisiones, sino que también compromete la capacidad de los países para alcanzar sus metas de carbono neutralidad. Dentro de las incertidumbres que sobresalen están aquellas derivadas de las limitaciones propias de los datos de inventario, los cuales son incapaces de observar los flujos de carbono directamente, lo que sí se puede lograr con el uso de torres de flujos (Figura 22.2). Estas utilizan sensores para medir, varias veces por segundo, el viento y la concentración de gases, como CO₂, en el aire. Esta técnica permite estimar cuánto carbono, agua y energía intercambia un ecosistema con la atmósfera. Estas torres son abundantes en el hemisferio norte, donde existen grandes redes de observación continua desde hace decenios, lo cual no ocurre en países menos desarrollados como Chile. Las principales razones de esta ausencia de torres son sus costos de inversión y mantención relativamente altos, pero, sobre todo, la escasez de personas con capacidades de especialización en esta área.

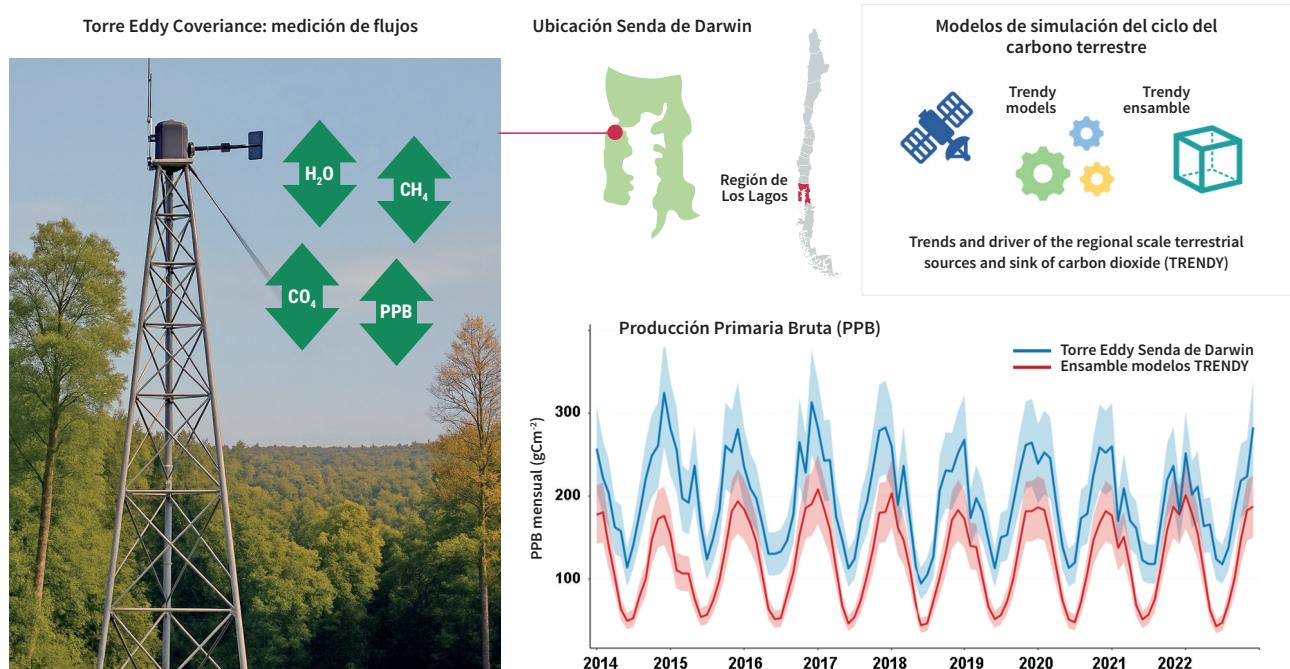


Figura 22.2: Torre de flujo localizada en el norte de Chiloé que mide flujos de carbono y otros gases. Se observa la serie temporal de la productividad primaria bruta (equivalente a las capturas de carbono) para el periodo 2014-2022. Se presenta la medición directa del flujo, junto con su incertidumbre, en sombreado de color azul. La línea roja representa los mismos flujos simulados por el ensamble de modelos TRENDY junto con su dispersión.



Recuadro 17



Otras opciones disponibles son el uso de técnicas de monitoreo satelital y de modelación, las cuales han demostrado ser de gran relevancia en otras latitudes donde se dispone de numerosos datos de validación en terreno. Uno de los ejemplos más conocidos son los modelos TRENDY, los cuales se utilizan a nivel global para evaluar el estado y el devenir de los ecosistemas. En Chile se ha observado cierta concordancia entre estos productos y las mediciones de las torres de flujos, lo que permite obtener información sobre la cantidad total de energía captada por la fotosíntesis de la vegetación (Figura 22.2). Sin embargo, las capturas retenidas por el bosque no se ajustan bien a los datos locales, mostrando baja convergencia entre los datos de Chile y los datos globales. Por tanto, el uso directo de estos modelos no garantiza éxito en Chile, puesto que muchos de nuestros bosques presentan características de funcionamiento singulares y se encuentran en territorios montañosos (ver Recuadro 17), lo que dificulta el uso de técnicas basadas en sensores remotos.

En este sentido, necesitamos un mayor desarrollo de la investigación para derivar modelos locales que se ajusten a las condiciones climáticas y territoriales del país. Esto se puede lograr, por ejemplo, mejorando la implementación de más torres de flujos en ecosistemas no medidos, aumentando las mediciones *in situ* y desarrollando esfuerzos de modelación más numerosos y de mayor calidad. De esta manera, se podrían cuantificar las capturas de carbono con una mayor cobertura espacial y temporal, lo cual podría resultar relevante ante un clima cambiante.

Las montañas y la estimación de balance del carbono (Javier Lopatin)

El cambio climático amenaza con provocar pérdidas irreversibles de la biodiversidad en las regiones montañosas, afectando los medios de vida, la identidad cultural, la regulación hídrica y la biodiversidad (Kapruwan et al., 2025). Esta situación es particularmente preocupante dado que las montañas actúan como refugio de especies endémicas y amenazadas a nivel global (Malik et al., 2025). En Chile, cerca del 43,4 % de los bosques nativos se ubican en los sistemas montañosos de la cordillera de los Andes y de la Costa. Esta realidad plantea importantes desafíos para el monitoreo del balance de carbono del país, considerando que una gran parte del territorio nacional corresponde a zonas de montaña (63,8 %, FAO, 2012) y que estas presentan altos niveles de incertidumbre en los sistemas de observación actuales.

La obtención de datos de campo en estas regiones es costosa y, en muchos casos, físicamente inaccesible, lo que ha llevado a una fuerte dependencia de la teledetección satelital y modelos para estimar variables clave como los reservorios de carbono y las características de la vegetación. Recientes investigaciones indican que las correcciones topográficas convencionales aplicadas a los datos satelitales no son suficientes para abordar la complejidad de la abrupta topografía chilena (Tarsetti, 2025). Como resultado, tanto los modelos físicos como los enfoques empíricos presentan limitaciones importantes al predecir variables como la biomasa aérea, la cobertura del dosel y rasgos funcionales del follaje (por ejemplo, contenido de clorofila o agua en las hojas; Tarsetti, 2025; Cherif et al., 2025). Esto se debe a que la reflectancia captada por los sensores satelitales en zonas montañosas está fuertemente influenciada por la pendiente, la orientación y las sombras topográficas, en lugar de reflejar directamente las propiedades biofísicas del ecosistema. En la investigación de Tarsetti (2025) se demostró que los errores de toda predicción están significativamente influidos por el relieve, lo que compromete el buen funcionamiento de los modelos. Esta situación constituye una fuente crítica de incertidumbre para las estimaciones del balance de carbono en las cordilleras chilenas, especialmente la de los Andes, y pone de manifiesto la necesidad de desarrollar enfoques más robustos y adaptados a estos entornos complejos.



Capítulo 23: Oportunidades de mejora en la cuantificación de los reservorios de carbono

Mauricio Galleguillos, Magdalena Corona, Álvaro Gutiérrez, Ximena Badilla y Javier Lopatin

Los reservorios de carbono de los ecosistemas pueden ser aéreos (madera de troncos, ramas gruesas, hojas, ramillas, corteza y raíces) o subterráneos (en los suelos), y no están considerados de manera completa en los INGEI, lo que limita la estimación precisa del carbono acumulado nacional y su eventual capacidad de emisión o captura según el manejo que se haga en ellos.

Existen esfuerzos por parte de la comunidad científica para disponibilizar bases de datos, las cuales resultan fundamentales para avanzar en la cuantificación del tamaño de los reservorios. Un ejemplo notable es la iniciativa *Chilean Soil Organic Carbon database* (CHLSOC) (Pfeiffer et al., 2020), que contiene más de 12.000 perfiles de suelo con datos de carbono orgánico y de densidad aparente del suelo. Esta base de datos ha permitido realizar una serie de investigaciones complementarias para avanzar en la cuantificación del reservorio del suelo (Asmussen et al., 2025; Dinamarca et al., 2023; Matus et al., 2024; Pavlovic et al., 2024). Sin embargo, esta misma base de datos también identifica grandes vacíos de información en zonas sin manejo silvoagropecuario donde subsisten ecosistemas poco alterados. Esto refleja una mayor inversión y, por ende, esfuerzo de muestreo en zonas manejadas. Por su parte, zonas naturales o naturalizadas (alteradas por acción humana, pero que conservan características naturales) también cuentan con poca información, la cual se genera principalmente a través de proyectos de investigación con financiamiento público. De esta manera, del total de perfiles de suelo disponibles en la base de datos, solo un 13,61 % corresponde a sectores con suelo de bosques nativos u otros reservorios de importancia, como turberas o formaciones vegetacionales que retienen altas cantidades de carbono. Esto implica concentrar esfuerzos en potenciar esta base de datos para que incluya un mayor número de ecosistemas de nuestra compleja geografía.

Para realizar estimaciones efectivas de los reservorios de suelo a nivel nacional, se presenta como alternativa el uso de herramientas de mapeo digital de suelos para extrapolar los valores de carbono más allá de los puntos con mediciones. Estas técnicas se originan en el modelo conceptual SCORPAN, que predice atributos del suelo, como el carbono, a partir de los principios teóricos que definen su formación: suelos, clima, organismos, relieve, rocas, edad y posición espacial. La era satelital ha permitido generar una vasta oferta de datos geoespaciales dentro de los cuales se pueden establecer la gran mayoría de los factores de formación de suelos y así utilizarlos como posibles predictores, los cuales son integrados en modelos de aprendizaje automático (McBratney et al., 2003; Boettinger et al., 2010; Padarian et al., 2019; Wadoux et al., 2020).

Estos permiten que los modelos ajustados con esta información geoespacial generen posteriormente mapas de atributos del suelo (Figura 23.1). Actualmente, existen diversos productos globales de suelos que aplican estos principios (Poggio et al., 2021), pero usualmente presentan limitaciones severas para representar nuestros suelos, dada la complejidad de nuestros paisajes y la escasa información de suelos equivalentes utilizada en estas iniciativas.

En Chile, los mapas de reservorios de carbono son escasos, aunque existe la posibilidad de generar mapas con el detalle suficiente para ser usados como referencia en la cuantificación del carbono del suelo, siguiendo el ejemplo del producto CLSoilMaps (Dinamarca et al., 2023), el cual representa un gran avance nacional para el monitoreo del suelo y su rol en el funcionamiento de los ecosistemas. Al respecto, siguiendo principios similares, Badilla et al. (2026) han recreado mapas de carbono en el suelo para Chile, obteniendo resultados aceptables en los desempeños de modelación. Estos mapas dan cuenta de la distribución espacial del carbono en Chile, destacando valores elevados en sectores del sur del país, donde se encuentran grandes extensiones de bosques nativos y turberas. También se observan valores elevados de carbono, aunque en mucho menor grado, en los suelos de otros ecosistemas nativos, así como en sectores de plantaciones forestales. Los suelos agrícolas y los del norte desértico presentan los niveles más bajos de carbono.

Aunque los avances son significativos, persisten vacíos en algunos ecosistemas y capas profundas, lo que abre paso a enfoques como **aprendizaje profundo**, que promete ventajas en contextos donde los datos de suelo son escasos, pero existe abundante información geoespacial, lo que permitiría aprovechar la estructura espacial y temporal de los paisajes para mejorar la representación del carbono y otros atributos en zonas donde no hay mediciones (Han et al., 2025).

Con respecto a los reservorios aéreos de carbono, estos se encuentran principalmente en la biomasa en pie de los bosques (cerca del 70 %). Este reservorio se distribuye en la madera de troncos y ramas gruesas, hojas, ramillas, corteza y raíces, siendo el principal componente el carbono contenido en la madera de los árboles, que aporta cerca del 50 % del carbono total. La biomasa en pie también puede cuantificarse a escala del paisaje mediante algoritmos de inteligencia artificial, incluyendo técnicas de aprendizaje automático y de aprendizaje profundo, que constituyen un área activa de investigación tanto a nivel nacional como internacional. A nivel global, iniciativas como el *Carbon Monitoring System* (CMS) de la NASA (Dubayah et al., 2022), el *ESA CCI Global Forest*



Above Ground Biomass (Santoro et al., 2025) o productos armonizados (Spawn et al., 2020) proporcionan mapas de biomasa a escala mundial. Estos modelos, en general, también presentan problemas de calidad al compararlos con datos *in situ* de Chile, por las mismas razones antes expuestas para el suelo. En efecto, cuando comparamos las estimaciones de estos productos con los valores provenientes de zonas monitoreadas por el INFOR o de investigaciones nacionales, observamos una importante subestimación, lo que repercute seriamente en la cuantificación del carbono presente en nuestros bosques (Corona et al., 2025).

Al respecto, desarrollos de teledetección han logrado resultados excelentes de modelación de biomasa a escala del paisaje, por ejemplo, el trabajo de Fassnacht et al. (2021), el cual logra estimar la biomasa de bosques, plantaciones forestales, matorrales y praderas con errores menores al 30 %. También se han logrado resultados acertados en **turberas antropogénicas** de la zona de Chiloé, donde, incluso, se logran separar los efectos del manejo de la turbera en el carbono almacenado en ella (Lopatin et al., 2019). En esta dirección se identifican iniciativas de ciencia aplicada que van en esta dirección, como se describe en el Recuadro 18. Esto demuestra que la cuantificación de reservorios aéreos en ecosistemas diversos de Chile es posible a escala del paisaje, pero todavía no contamos con productos a nivel nacional estimados con métodos de vanguardia y, en el mejor de los casos, con datos multitemporales. Mayores esfuerzos de investigación siguen siendo necesarios a este nivel.



Recuadro 18

Plataforma de estimación de carbono en ecosistemas de relevancia (Felipe Díaz)

A nivel nacional existe la iniciativa CarbonSink-Chile, que plantea el desarrollo de una plataforma en línea tipo Sistema de Información Geográfica que permita a titulares de proyectos, profesionales evaluadores y sociedad civil seleccionar polígonos de interés y cuantificar tanto el carbono almacenado (*stock*) en sumideros naturales como el CO₂ que estos fijarían anualmente, estimando así las emisiones por pérdida de *stock* y la reducción en la fijación futura asociadas a disturbios significativos. Después de ingresar un polígono de estudio, la plataforma en línea identifica tipos de cobertura para filtrar los que corresponden a sumideros naturales. Luego, el cálculo de carbono se basa en modelos de balances de biomasa aérea y subterránea y de carbono orgánico del suelo, focalizados, inicialmente, en bosques esclerófilos y húmedos costeros de las regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. Los modelos se alimentan de datos satelitales para estimar el *stock* de carbono y la productividad primaria neta y se calibran y validan mediante mediciones de campo.

La iniciativa, financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) y desarrollada como una colaboración entre la Universidad de Chile y el Sistema de Evaluación Ambiental (SEA), busca fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia y asegurar un acceso transparente a la información durante la evaluación ambiental, constituyendo el primer proyecto de investigación financiado por ANID en que el SEA participa como entidad asociada. De acuerdo con los antecedentes revisados, no hay plataformas de estas características en otros sistemas de evaluación ambiental del mundo, por lo que el desarrollo de la plataforma, incluyendo el sistema de manejo de datos, así como los modelos, podría ser replicado internacionalmente para contribuir a la evaluación de proyectos de inversión considerando los criterios de carbono neutralidad.



Capítulo 24:

Contribución de la modelación ecológica para conocer los balances de carbono presentes y futuros de bosques

Álvaro Gutiérrez, José Osses y Mauricio Galleguillos

Los bosques cumplen un rol central en la captura y almacenamiento de carbono, y son clave para definir acciones de mitigación frente al cambio climático. Sin embargo, persisten incertidumbres sobre cómo su función de sumideros se verá afectada por cambios inducidos por el ser humano o por perturbaciones futuras. Una herramienta para abordar estas incertidumbres son los modelos dinámicos de vegetación (MDV), que simulan la composición y la estructura de los bosques considerando el clima, los procesos demográficos y los disturbios (Snell et al., 2014). Entre ellos, los modelos de dinámica de claros (Botkin et al., 1972; Bugmann & Seidl, 2022) permiten representar el desarrollo individual de los árboles y obtener variables estructurales necesarias para estimar el ciclo del carbono (Fischer et al., 2016). Estos modelos han demostrado ser fiables para predecir la composición y estructura futura de bosques bajo cambio climático (Bugmann, 2014).

El esquema de la Figura 24.1 resume los parámetros de entrada, los procesos y las salidas del modelo en el contexto de las estimaciones de carbono. Para simular la dinámica del bosque, los MDV integran procesos demográficos fundamentales (reclutamiento, crecimiento, morta-

lidad; Bugmann, 1996) y parámetros especie-específicos como altura y diámetro máximos, tolerancia a la sombra o a la sequía, e incrementos de crecimiento derivados de la **autoecología** documentada en Chile (Donoso, 2006). Como insumos de sitio, utiliza información climatológica (CR2, 2019), de suelos (CLSoilMaps; Dinamarca et al., 2023) y de la historia de disturbios. Un punto de simulación representa entre 16 y 25 hectáreas (cerca de 1 km²).

Uno de los desafíos persistentes es reconstruir la historia de los disturbios, pues la acumulación de biomasa depende del manejo forestal previo. Modelos como ForClim (Bugmann, 1996; Huber et al., 2020) incluyen módulos de manejo que permiten representar regímenes silvícolas (Rasche et al., 2012). En Chile, la escasez de información puede suplirse con mapas dinámicos de cobertura terrestre (e.g. MapBiomas) que permiten estimar disturbios a escala de paisaje como incendios o deforestación (Krause et al., 2022). Para disturbios más locales (inferiores a 20 hectáreas), los sensores de radar han demostrado su utilidad para validar cambios en la estructura vertical del bosque (Henniger et al., 2023).

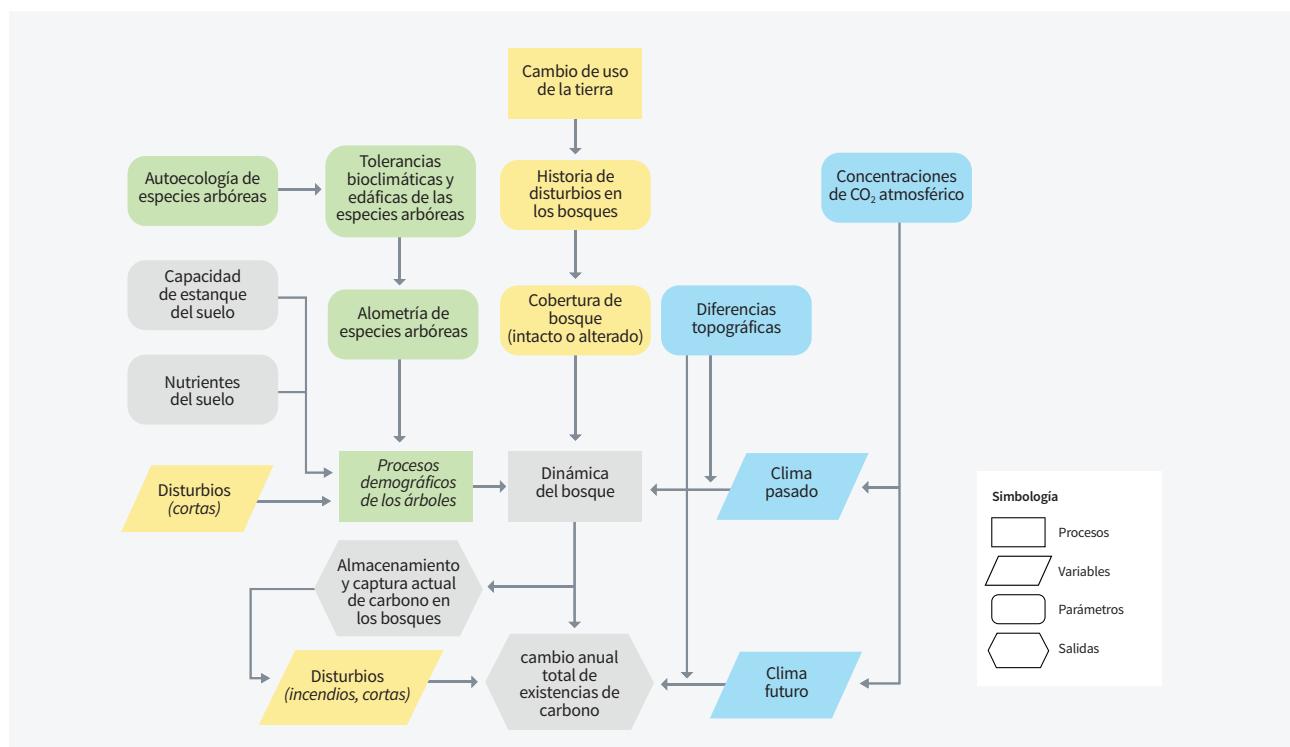


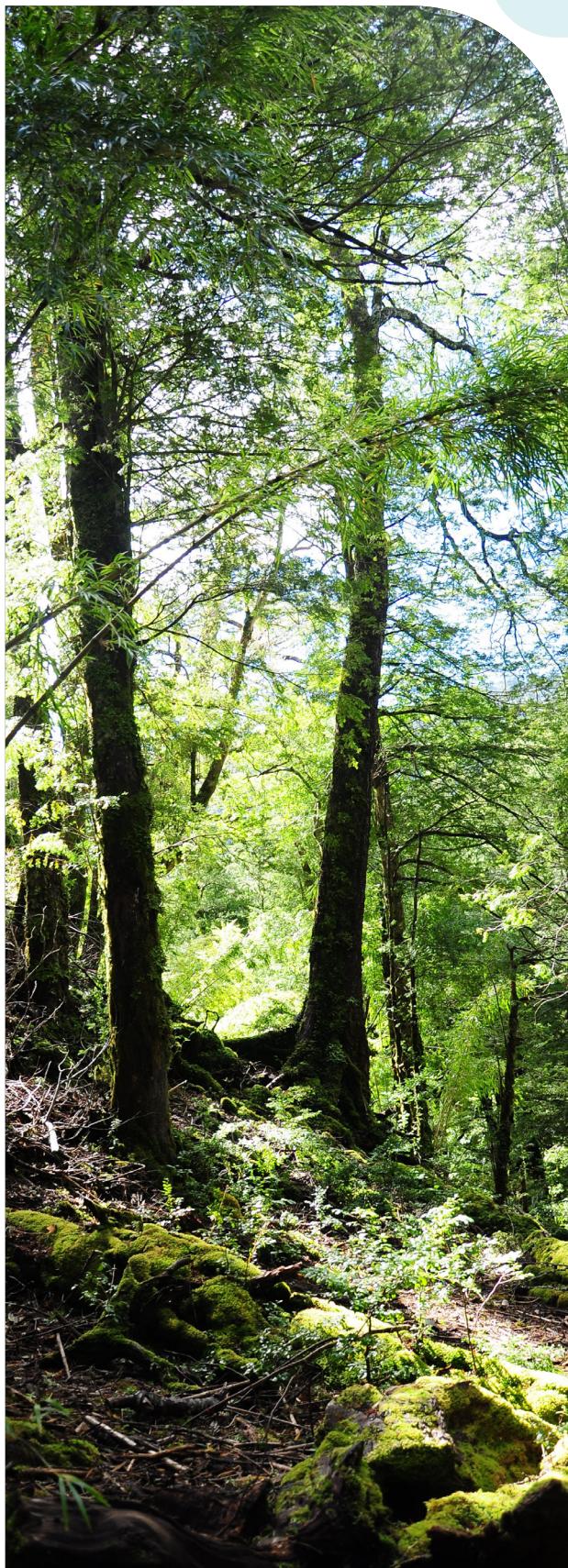
Figura 24.1: Esquema de las variables, parámetros y procesos involucrados en la estimación del almacenamiento de carbono en los bosques mediante modelos dinámicos de vegetación. Los colores diferencian fuentes de información ecológica (color verde), de forzantes climáticas (color celeste) y de forzantes humanas (color amarillo) en la dinámica de los bosques. El color gris alude a las características y procesos propios del bosque simulado.



Los MDV calculan anualmente el crecimiento arbóreo en diámetro y altura según la luz disponible, la humedad del suelo, la temperatura estacional y, en algunos casos, la concentración de CO₂. Con funciones específicas, la biomasa individual se agrega a nivel de bosque, lo que permite estimar la productividad primaria neta. Para predicciones futuras, los modelos se fuerzan con escenarios climáticos y probabilidades de ocurrencia de disturbios, considerando retroalimentaciones como incendios más frecuentes bajo cambio climático (Layritz et al., 2024).

En Chile, se han obtenido resultados preliminares prometedores con el MDV ForClim, logrando simulaciones del almacenamiento de carbono con ajustes cercanos al 70 % con respecto a los datos de las parcelas de biomasa existentes para la zona entre el Maule y Aysén (730 parcelas de verificación y 365.500 hectáreas de bosque simuladas) (Gutiérrez et al., 2025). Aun así, las predicciones están condicionadas por tres grandes fuentes de incertidumbre: 1. La teoría ecológica (verde en Figura 24.1), asociada a supuestos sobre la autoecología de especies poco estudiadas; 2. La forzante humana (naranja), vinculada a cambios de uso del suelo y disturbios pasados; y 3. La forzante climática (azul), limitada por la resolución de productos grillados (cercanos a 5 km), insuficiente para representar microclimas (inferiores a 1 km).

Dado que la incertidumbre en la modelación ecológica no es completamente eliminable (Milner-Gulland & Shea, 2017), se sugiere priorizar la robustez de las simulaciones sobre la precisión puntual. La modelación dinámica debe entenderse como un ciclo de aprendizaje (Hilborn & Mangel, 1997) en el que los resultados obtenidos con los datos actuales permitan no solo informar decisiones, sino también formular nuevas hipótesis para reducir incertidumbres y riesgos y mejorar la comprensión de los bosques en escenarios futuros.

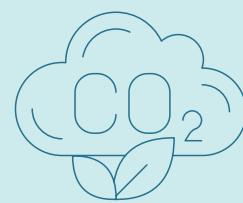




Sección 6:

Una mirada a la implementación de rutas justas para la carbono neutralidad en Chile

- Las acciones climáticas de restauración y reforestación de ecosistemas nativos, la protección y conservación de ecosistemas costeros, así como la disminución del riesgo de incendios, son fundamentales para lograr la carbono neutralidad.
- La inclusión y mejora de prácticas de manejo sostenible de suelos, paisajes y ecosistemas costeros, así como la planificación urbana sensible al clima permiten avanzar hacia la carbono neutralidad y el desarrollo resiliente al clima.



Sección 6: **Una mirada a la implementación de rutas justas para la carbono neutralidad en Chile**

Esta sección profundiza en rutas justas hacia la carbono neutralidad -desde los paisajes a las ciudades- sustentadas en el desarrollo resiliente al clima (DRC) y en una gobernanza climática guiada por la justicia. Las rutas propuestas en esta sección muestran modelos que permiten lograr una acción climática justa, con beneficios distributivos, participación efectiva y fortalecimiento de capacidades en múltiples escalas territoriales, desde asentamientos urbanos hasta sistemas socioecológicos.



Capítulo 25: Paisajes resilientes para la carbono neutralidad

Mauro E. González y Antonio Lara

Si bien los centros urbanos concentran buena parte de las emisiones, hay oportunidad para acelerar la carbono neutralidad en la gestión de los paisajes no urbanos, los que tienen potencial para aumentar su contribución a la carbono neutralidad. En ellos es posible incrementar la superficie gestionada de sumideros, reducir riesgos y generar desarrollo con pertinencia territorial.

La última década mostró que los megaincendios –gatillados por sequías más intensas y prolongadas, mayor frecuencia de eventos extremos y paisajes más susceptibles al fuego– pueden convertir al principal sumidero, el sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS), en una fuente neta de emisiones. En 2017, por ejemplo, las 570.000 hectáreas quemadas en la zona centro-sur liberaron más de 68 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂eq), especialmente en regiones con alta cobertura de plantaciones forestales bajo estrés hídrico. Evitar esas pérdidas y robustecer los sumideros ofrece un doble dividendo para la carbono neutralidad y el desarrollo resiliente al clima (DRC).

La vía para materializar ese beneficio es un portafolio de oportunidades que, además de evitar emisiones masivas por incendios, incremente la captura y almacenamiento de carbono y mejore los servicios ecosistémicos, generando empleo territorial y reduciendo desigualdades. La planificación del uso del suelo orientada al clima prioriza bosques nativos, turberas y humedales como infraestructura ecológica, restringe nuevas urbanizaciones y parcelaciones en esos sistemas y gestiona la interfaz urbano-rural con criterios de riesgo y carbono neutralidad. Cuando esta planificación se implementa rigurosamente en la interfaz urbano-forestal y se acompaña de silvicultura preventiva —disminución de biomasa a través de raleos, podas y fajas cortafuego—, disminuye la probabilidad de eventos catastróficos.

La construcción de paisajes resilientes avanza cuando se reconfigura un paisaje homogéneo y continuo de plantaciones forestales, altamente susceptible a la propagación de incendios, por un mosaico multifuncional de coberturas y uso de suelos, como bosque nativo, plantaciones manejadas, praderas, matorrales y agricultura, que interrumpen la continuidad de combustible, y diversifican las oportunidades económicas en base a su aptitud, vocación y pertinencia cultural. Así, una mayor heterogeneidad reduce la severidad de los incendios, mejora la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad, y aumenta la captura y el almacenamiento de carbono en biomasa y en suelos. Además, estos paisajes favorecen la compatibilización de la provisión de diferentes bienes y servicios (p. ej., madera, productos agropecuarios, turismo) con la provisión de agua, protección de la biodiversidad y la captura y secuestro de carbono, entre otros

servicios ecosistémicos (Álvarez-Garretón et al., 2018; Lara et al., 2018; González-Gómez, 2022; Galleguillos et al., 2022). Por el contrario, un paisaje homogéneo y continuo dominado por plantaciones, una vez quemado, requiere una alta inversión para su restauración debido a la fuerte invasión de pinos y eucaliptos (Leal-Medina et al., 2023; González et al., 2022a). Este agresivo proceso de invasión impone serias barreras para la recuperación natural o la restauración de los escasos parches de vegetación nativa, de los cuales es muy difícil, o incluso imposible, salir, aun con una alta inversión.

Un **manejo forestal estratégico**, concebido a escala de rodal y paisaje, incorpora mezcla de especies, edades y densidades, establece **rodales** de menor tamaño (menos de 50 hectáreas) y promueve plantaciones mixtas y multipropósito, incluidos sistemas silvopastorales. Estas decisiones reducen la carga de combustible y mejoran la resiliencia sin comprometer la productividad, pudiendo incluso aumentarla (Gómez-González et al. 2022). Asimismo, el control o eliminación periódica de especies exóticas invasoras, como pinos, eucaliptos y aromos, reduce una de las principales amenazas a los bosques nativos y facilita su restauración (Leal-Medina et al., 2023; Braun et al., 2021; González et al., 2022b).

Por otro lado, la restauración ecológica es una estrategia que busca reparar ecosistemas dañados o degradados, con el objetivo principal de restaurar su salud, integridad y funciones naturales (SER, 2004). Esta estrategia está alineada con la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) y la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP), ya que junto a la recuperación de la biodiversidad, servicios esenciales y resiliencia, maximiza el carbono almacenado y su tiempo de residencia (Little y Lara, 2010; Bannister et al., 2024). Los programas “+Bosques” y “Siembra por Chile” van por esta línea, ofreciendo bases sólidas para avanzar en el Plan Nacional de Restauración de Paisajes y cumplir el compromiso de la NDC de restaurar un millón de hectáreas al 2030, por tanto, se requiere asegurar su continuidad. A su vez, el compromiso del sector forestal se debe redoblar en la protección y restauración de las Áreas de Alto Valor de Conservación y reconversiones de plantaciones con especies introducidas a bosque nativo (Lara et al., 2022; Lara et al., 2024) de manera de incrementar la heterogeneidad del paisaje y la resiliencia frente al cambio climático.



Recuadro 19

Incentivos forestales (Beatriz Pogorelow)

Los incentivos forestales han tenido una larga data en nuestro país como respuesta a diferentes objetivos, y han sido encauzados a través de leyes y programas. En el presente contexto podemos destacar: las bonificaciones otorgadas por la Ley N° 20.283, mediante el Fondo de Conservación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo; el programa +Bosques, financiado mediante el pago por resultados REDD+ del Fondo Verde del Clima en el marco de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales; y el programa Siembra por Chile y su Plan de restauración de bosques nativos a gran escala.

La historia de resultados de estos subsidios, en número de hectáreas (Tabla 5), muestra un total de 108.109 hectáreas con intervención a 2024, quedando un 75 % de las metas por cumplir con los compromisos establecidos en las NDC en términos de hectáreas. El avance es limitado y también lo es la disponibilidad de datos e indicadores de seguimiento y evaluación de estas inversiones.

Tabla 5: Resultados en hectáreas y montos por año

Programa/Año ejecución	Monto \$ (M\$/USD\$)	Hectáreas
Siembra por Chile total	M\$ 31.427	26.879,74 ha
2023	10.660 M\$	16.238,23 ha
2024	9.868 M\$	10.641,51 ha
2025	10.899 M\$	3.017,80 ha a julio 2025
*Actividad Forestación (2023-2025)		*1.076,3 ha
+Bosques total	USD\$ 46.047.188	22.005 ha
2022		4.602 ha
2023		5.965 ha
2024		11.438 ha
* Total Programa de manejo forestal (US1) (2022-2024)		*6.405 ha
* Total Fortalecimiento del programa de restauración ecológica (MT5) (2022-2024)		*6.485 ha
Ley de Bosque Nativo (2010-2024)	Total USD\$ 21.530.378	Total 59.225 ha
*Literal preservación (2010-2024)	USD\$ 339.693	1.504 ha
2010-2020	231.202	1.103,26
2021	29.440	96,77
2022	36.236	127,4
2023	13.659	62,94
2024	29.154	113,97
*Literal Producción maderera (2010-2024)	USD\$ 18.508.043,94	49.298,8 ha
*Literal Producción no maderera (2010-2024)	USD\$ 2.682.641,142	8.422,1 ha

Fuente: Elaboración propia en base a CONAF 2025 mediante solicitud de transparencia (*programas específicos para años indicados, no sumados)



Capítulo 26: Parcelaciones en ecosistemas sensibles y carbono neutralidad

Rocío Urrutia-Jalabert, Mauricio Galleguillos, Jorge Herrera y Antonio Lara

Una de las acciones que nos alejan del objetivo de lograr la carbono neutralidad y construir paisajes resilientes al cambio climático es la expansión inmobiliaria en zonas cubiertas por bosques. En particular las subdivisiones de tierras rurales o parcelaciones, pueden afectar ecosistemas sensibles, alterando su capacidad de proveer servicios ecosistémicos y generando efectos irreversibles en ellos.

En Chile, a la fecha no existe una legislación efectiva que permita regular este fenómeno, y la evidencia reciente basada en análisis geoespaciales y modelos de aprendizaje automático ha revelado una tendencia creciente de subdivisiones prediales con un patrón espacial de alta intensidad en tierras con muy alto valor ecológico y suelos con un alto potencial agrícola (Herrera-Benavides et al., 2024). Esta situación plantea grandes preocupaciones relativas a la fragmentación de paisajes y sus riesgos asociados, como la invasión de especies exóticas, disminución del hábitat de especies vulnerables, eliminación de corredores biológicos y aumento de la vulnerabilidad a perturbaciones antropogénicas como la deforestación y los incendios, que impactan en las capturas contabilizadas para la carbono neutralidad.

La identificación de los principales impulsores de la parcelación en ecosistemas sensibles permite anticipar las zonas donde este proceso podría intensificarse a corto plazo. Estas zonas se caracterizan por una muy alta relevancia ecosistémica, incluyendo bosques cercanos a áreas protegidas y por su amplia distribución en los paisajes estudiados, lo que destaca la necesidad urgente de regulación.

Un antecedente que demuestra las consecuencias actuales de esta situación es la aparición de numerosas cortas ilegales de alerce (especie protegida) para construir caminos y habilitar parcelas destinadas a vivienda (Figura 26.1). Esta habilitación, en muchos casos, va acompañada de la construcción de zanjas de drenaje. Esto último seca los suelos, alterando el hábitat de los alerces y su supervivencia, y, a la vez, reduce las reservas de agua indispensables para los ecosistemas y las personas. De esta manera se están destruyendo ecosistemas que albergan una importante biodiversidad y almacenan grandes cantidades de carbono en la vegetación y en los suelos altamente orgánicos.

Lo anterior se ha tornado particularmente común y grave en los alrededores de la ciudad de Puerto Montt, entre otros *hotspot* identificados en la región de Los Lagos. Este fenómeno implica la pérdida irreversible del suelo, dado que, una vez urbanizado, rara vez vuelve a su uso original. Además, constituye el cambio de uso con efectos más severos sobre el medio ambiente y las funciones del suelo al reemplazar los servicios ecosistémicos originales por usos residenciales. Es necesario regular este proceso cambiando la legislación que permite parcelar en lugares con ecosistemas sensibles, dándoles mayor potestad jurídica a los instrumentos de planificación territorial, reforzando la fiscalización de CONAF y aplicando por parte de los Juzgados de Policía Local las severas multas que establece la ley cuando se afectan especies en peligro de conservación.



Figura 26.1: Corte ilegal de alerce y alteración de su hábitat para habilitar parcelaciones en los alrededores de Puerto Montt. Fotografía de Rocío Urrutia-Jalabert



Capítulo 27: Prácticas sostenibles en manejo de suelo y carbono neutralidad

Óscar Seguel, Mauricio Galleguillos y Claudia Rojas

El carbono orgánico del suelo (COS) es muy susceptible a las prácticas de manejo, asociadas principalmente a la actividad humana del sector silvoagropecuario. Cualquier práctica que vaya en la dirección de alterar la estructura física del suelo, tales como las quemas de rastrojo, el paso de arado para la siembra o el uso de maquinaria para subsolar y mezclar el suelo para la plantación de árboles frutales o de plantaciones forestales, genera un impacto negativo en varias propiedades del suelo, destacándose la pérdida de materia orgánica. Bajo este manejo se puede favorecer la emisión de CO₂ a la atmósfera, transformando al suelo en un agente emisor en lugar de un sumidero.

En efecto, cuando el suelo se rompe, entra más aire y aumenta la respiración de los microorganismos y raíces que viven en el suelo, liberando el CO₂ contenido en la materia orgánica. Al perder carbono, el suelo pierde su estructura, lo que lo lleva a la degradación, que se manifiesta como compactación y erosión. Así, la protección del COS y la calidad del suelo quedan definidas por los usos: el bosque nativo es el que ofrece mayor protección al suelo, seguido por la plantación forestal, luego por el agrosilvopastoreo, seguido por la **labranza de conservación** y, por último, el uso que da menos protección al suelo es la **labranza tradicional**. Sin embargo, esta última puede mantener los niveles de COS en el tiempo si reincorpora los rastrojos al suelo y evita las quemas. Al respecto, tanto las quemas controladas como los incendios generan grandes pérdidas de carbono a la atmósfera, con procesos de degradación ambiental que se desarrollan en cadena, asociados al incremento de la escorrentía, al menor almacenamiento de agua, a la erosión y la pérdida de la diversidad del suelo (Alcañiz et al., 2018; Gómez-González et al., 2019).

Ejemplos de procesos de pérdida de COS han sido reportados ampliamente en la agricultura chilena, con niveles de pérdidas que alcanzan hasta el 50 % del carbono original previo a la conversión agrícola desde vegetación nativa (Ellies, 1995; Dörner et al., 2011; Seguel et al., 2015). También se ha observado este proceso en plantaciones industriales de *Pinus radiata*, principalmente debido a malas prácticas durante la cosecha forestal, donde se ha registrado una disminución significativa de la materia orgánica al contrastarla con los montos medidos en bosques nativos de referencia (Soto et al., 2019). En este sentido, prácticas de manejo que propendan a reducir la pérdida de suelo y de materia orgánica son fundamentales. Entre las principales prácticas de manejo sostenible, destacan las cubiertas de suelo vivas (como cultivos de cobertura) o de origen orgánico, como el mulch y el compost (Seguel et al., 2020). Estas no solo disminuyen el impacto de la gota de lluvia y, con ello, disminuyen los procesos erosivos, sino que también mejoran la capaci-

dad de almacenamiento de materia orgánica y su principal componente, que es el carbono orgánico. En esta misma línea, sistemas de labranza de conservación, como la **cero labranza** y la **labranza vertical**, permiten mantener la protección superficial del suelo, la preservación de la estructura y la conservación del COS (Six et al., 2004; Brunel-Saldías et al., 2016). También, el uso de compost o de enmiendas orgánicas mejora la agregación y constituye un insumo directo para incrementar el COS como estrategia de mitigación del cambio climático (Seguel et al., 2021).

Todas estas prácticas constituyen una acción concreta a la hora de implementar una gestión sostenible del recurso suelo; sin embargo, en zonas semiáridas también se debe considerar el aporte del carbono inorgánico como una estrategia potencial de captura de carbono en el suelo, ya que las diversas prácticas, como aplicación de enmiendas, fertilización y riego, pueden generar las condiciones tanto para favorecer su acumulación como para generar emisiones de CO₂ (Ovalle et al., 2023).





Capítulo 28:

Comunidades costeras y acciones para la carbono neutralidad

Noelia Carrasco y Laura Farías

Chile, gracias a su extensa costa, su elevada productividad biológica y la gran diversidad de ecosistemas que albergan humedales y bosques de macroalgas, posee una ventaja estratégica única para consolidarse como líder regional en políticas de carbono azul. Integrar estos ecosistemas en estrategias de mitigación y adaptación, mediante su protección, conservación y restauración, es fundamental para avanzar hacia políticas de carbono neutralidad con identidad oceánica.

Este potencial se materializa cuando se articula con conocimientos, prácticas y arreglos de gobernanza de las comunidades costeras que habitan y gestionan estos ecosistemas. Los arreglos de gobernanza necesarios son aquellos policéntricos, participativos y adaptativos, que permitan la cogestión entre comunidades, Estado, academia y sector productivo, distribuyendo responsabilidades y beneficios de manera equitativa. Para ello, es fundamental que las intervenciones externas identifiquen los procesos y acuerdos que internamente establecen las comunidades costeras que, agrupadas formal e informalmente, reproducen sistemas de uso basados en principios de cuidado y conservación. En este tipo de sistema de gobernanza local, las comunidades costeras, pescadores artesanales, recolectoras de orilla y comunidades indígenas no solo extraen recursos marinos y costeros, sino que también asumen explícitamente la responsabilidad de regular su acceso, monitorear su estado ecológico y sostener su reproducción futura (Cid et al., 2024; Gelcich et al., 2010). En algunas áreas, la gobernanza toma forma en el comanijo territorial como las Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos, donde las organizaciones locales acceden a derechos de uso exclusivos en tramos definidos de costa y, con esa responsabilidad, elaboran planes de manejo, acuerdan vedas, fijan cuotas y sostienen la fiscalización entre pares. Así, las reglas no “llegan de afuera”, sino que se construyen en la práctica cotidiana y se hacen cumplir en el propio territorio (Gelcich et al., 2010). En otras zonas, la gobernanza local en el litoral se extiende más allá de un recurso puntual y se configura como una red de “comunes costeros”, playas, estuarios, bancos de algas, agua dulce, bosque nativo y también saberes comunitarios, cuyo cuidado se negocia colectivamente mediante sistemas de gobernanza múltiples y superpuestos (gobernanzas locales, gobernanzas estatales, gobernanzas privadas) (Cid et al., 2024). En estos contextos, las gobernanzas locales no son oficiales y, por tanto, tampoco se hacen visibles ante la aplicación de normativas y políticas públicas. Se trata de gobernanzas que se expresan en acuerdos de “descanso” o vedas internas, prácticas autogestionadas de restauración de ecosistemas y de vigilancia comunitaria, entre otras, que dan cuenta de sistemas socioculturales vivos y disponibles para contribuir con los procesos ecológicos y económicos locales.

Las comunidades costeras con arraigo histórico y cultural han afrontado las transformaciones ambientales y de mercado que inciden en sus sistemas de vida. Por este motivo se les reconoce como comunidades resilientes en las cuales se entrelazan el desarrollo de técnicas que amortiguan cambios climáticos y económicos, innovaciones colectivas que convierten amenazas en oportunidades, y la organización de redes comunitarias que negocian el acceso y establecen normas de uso. Estas mismas dinámicas ofrecen oportunidades concretas para la carbono neutralidad. Primero, la diversificación productiva basada en macroalgas, como el cochayuyo, y la presencia de áreas de manejo comunitario que, al incluir criterios ecológicos propios de los sistemas de gobernanza local, incrementan la captura biogénica de CO₂ sin generar emisiones adicionales. Segundo, la valorización de circuitos cortos —venta local y cadenas logísticas regionales— reduce el consumo de combustibles fósiles, refuerza la soberanía alimentaria y mejora la rentabilidad comunitaria. Tercero, la restauración de ecosistemas, liderada por comunidades costeras, crea sumideros de carbono y protege servicios ecosistémicos que amortiguan eventos extremos en sintonía con la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) y las recomendaciones del IPCC sobre justicia climática.

No obstante, persisten barreras estructurales que afectan tanto la resiliencia como la meta climática de carbono neutralidad. La expansión de monocultivos terrestres y marinos reduce los sumideros y fragmenta hábitats, y la escasa valoración institucional de los sistemas de conocimiento ecológico locales y tradicionales dificulta que estas comunidades participen en mecanismos de gobernanza más amplios a nivel territorial. Otra barrera importante es, justamente, la que se deriva de la invisibilización de los sistemas de gobernanza local, tal y como se describe previamente. En estos sistemas se anidan conocimientos y prácticas que pueden ser valiosos aliados en iniciativas para favorecer la conservación y la carbono neutralidad. Por último, existen barreras económicas que impiden contar con recursos para financiar iniciativas y favorecer la sustentabilidad de procesos de gobernanza multiactores. Si bien en la actualidad existen instrumentos que están favoreciendo este tipo de gobernanza haciéndola vinculante a decisiones con sentido territorial —como es el caso de los Planes Estratégicos de Recursos Hídricos, DGA según Decreto Supremo N° 58/2023— se requiere aún de mayor articulación entre la diversidad de actores y de sus respectivos puntos de vista. Abordar estas brechas exige articular carbono neutralidad y resiliencia costera, situando a la diversidad de actores y a los sistemas de conocimiento en el centro de la estrategia climática respecto a beneficios medibles, ofreciendo una senda de desarrollo bajo en carbono que es, a la vez, culturalmente pertinente y socialmente justa.



Recuadro 20

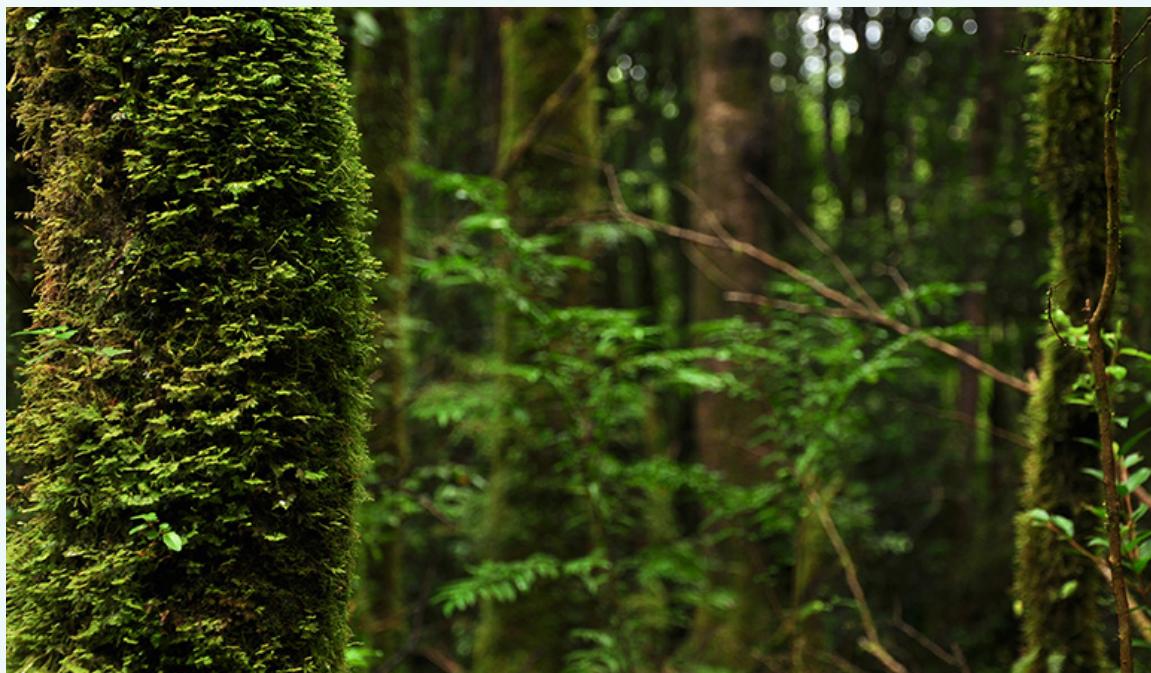
Refugios climáticos y rutas justas hacia la carbono neutralidad (*Ana María Ugarte, Laura Ramajo, Pilar Aparicio, Catalina Aguirre, Laura Farías, Martín Jacques-Coper, Pamela Smith y Eugenia Gayo*)

Los refugios climáticos han emergido en el ámbito socioecológico y de la planificación urbana como estrategia para enfrentar impactos crecientes del cambio climático. Desde una perspectiva socioecológica, son espacios relativamente estables en términos microclimáticos y ecológicos que permiten la persistencia y funcionalidad de sistemas naturales y humanos (Morelli et al., 2016; Loarie et al., 2009; Ashcroft, 2010; Birks, 2015; Morelli et al., 2020). Incluyen desde bosques, cuencas y humedales hasta hábitats marinos como praderas de macroalgas (Carroll et al., 2023; Graham et al., 2023; Sanchez de Pedro et al., 2023; Wilkes et al., 2023). En el medio urbano, los refugios climáticos corresponden a espacios públicos equipados con infraestructura verde–azul (arbolado, parques inundables, humedales, ríos, lagunas y superficies permeables) y, también, a equipamientos (bibliotecas, centros comunitarios, escuelas) y corredores sombreados, acondicionados para resguardar a la población frente a extremos térmicos.

La relevancia de esta red de refugios -naturales y urbanos- para la carbono neutralidad es doble, pues integra mitigación y adaptación. En paisajes naturales, su protección y restauración conservan y potencian sumideros de carbono y resguardan servicios ecosistémicos.

En ámbitos urbanos, los refugios mejoran el confort térmico y disminuyen la demanda energética de refrigeración y calefacción, contribuyendo a evitar emisiones, mejorando, a su vez, la salud y bienestar de la población (Berisha et al., 2017; Widerynski et al., 2017; López et al., 2023; Amorin-Maia et al., 2023).

Para maximizar su aporte a la carbono neutralidad, la identificación y gestión de refugios deben basarse en criterios científicos claros que combinen dimensiones climáticas y ecológicas, psicosociales y culturales, y contar con monitoreo, reporte y verificación, que mida carbono, accesibilidad, uso social y beneficios distributivos. Asimismo, es necesario que su gestión se realice bajo contextos participativos y colaborativos, con enfoque territorial, atendiendo a las dinámicas particulares de los diferentes socioecosistemas. En Chile ya se observan avances: la actualización del Plan de Adaptación del sector Ciudades (2025–2030) incorpora evaluaciones piloto de refugios climáticos urbanos, y diversos gobiernos regionales y municipios han adoptado este concepto en proyectos y lineamientos. Integrar estos esfuerzos con la LMCC, la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) y las NDC permitiría consolidar una red de refugios climáticos que contribuya de forma verificable a la carbono neutralidad en ciudades, asentamientos humanos y paisajes





Capítulo 29:

Planificación urbana sensible al clima y carbono neutralidad

Eugenia Gayo, Pamela Smith, María Christina Fragkou, Gabriela Guevara y Mauricio Galleguillos

Las zonas urbanas concentran gran parte de las emisiones de GEI, especialmente por transporte, edificación y consumo energético. Alcanzar la carbono neutralidad requiere reconfigurar cómo planificamos, construimos y gestionamos las ciudades. Las decisiones urbanas no solo determinan las trayectorias de emisión, sino también la capacidad de adaptación y la calidad de vida.

En este marco, la planificación urbana sensible al clima se plantea como una estrategia decisiva para lograr ciudades carbono neutrales y resilientes. Esto supone orientar el uso del suelo, la forma urbana, la movilidad, la vivienda, la energía y la infraestructura hacia modelos que reduzcan la exposición y la vulnerabilidad con criterios de justicia. En el caso de la vivienda, esta dimensión se refleja en el diseño térmico y energético del hábitat residencial, donde las políticas de acondicionamiento han mostrado avances y desafíos para la carbono neutralidad (ver Recuadro 21). Al incorporar factores no climáticos —equidad, movilidad inclusiva y acceso a servicios básicos— estas propuestas generan cobeneficios y consolidan trayectorias de desarrollo resiliente al clima (DRC).

En Chile, donde el 87,8 % de la población vive en ciudades y la urbanización continúa expandiéndose, hacer de la planificación urbana sensible al clima un eje de la política urbana es indispensable para alcanzar la carbono neutralidad y garantizar la justicia territorial. En esta línea, se han identificado acciones concretas para las ciudades chilenas que permiten simultáneamente contribuir a la carbono neutralidad, disminuir riesgos climáticos urbanos y fortalecer el DRC (Tabla 6). Entre ellas destaca especialmente la infraestructura verde–azul, concebida como una red viva de arbolado, parques inundables, humedales, ríos, lagunas y superficies permeables que integra el clima en todas las capas de la ciudad. Bien planificada, opera como acción conjunta mitigación-adaptación: captura y almacena carbono, modula el clima urbano y reduce la demanda energética para calefacción y refrigeración, generando cobeneficios en calidad del aire, salud y bienestar.

Tabla 6: Acciones de planificación urbana sensible al clima y sus aportes a la carbono neutralidad (adaptado de Smith et al., 2024).

Acción	Aporte a la carbono neutralidad
Fomentar el uso de colores claros en muros y pavimentos para aumentar la capacidad de las superficies para reflejar la radiación solar y reducir el efecto de isla de calor.	Superficies claras reducen la acumulación de calor, bajan la necesidad de aire acondicionado y las emisiones asociadas.
Reducir el uso de asfalto y optar por superficies con mayor capacidad de reflejar la radiación solar, para disminuir la acumulación de calor y las temperaturas urbanas.	Superficies alternativas al asfalto -como el pavimento permeable, la vegetación y la grava- reducen la temperatura urbana, disminuyendo la necesidad de refrigeración y las emisiones energéticas.
Incorporar materiales aislantes para reducir pérdidas y ganancias de calor, disminuyendo la demanda de energía en verano e invierno.	El uso de materiales aislantes reduce el consumo eléctrico y de combustibles, lo que disminuye las emisiones de GEI.
Disminuir la densidad de construcciones para reducir la acumulación y la reemisión de calor, lo que baja especialmente las temperaturas nocturnas.	Reducir la acumulación de calor disminuye la demanda de refrigeración y las emisiones eléctricas, mientras que una menor densidad de construcciones libera suelo para infraestructura verde–azul que potencia el secuestro de carbono.
Aumentar la capacidad de las edificaciones para generar más sombra y reducir la radiación incidente y el calor acumulado en áreas urbanas.	Más sombra y menor radiación reducen la demanda de refrigeración, lo que baja el consumo energético y las emisiones.
Adaptar la continuidad de las fachadas según la orientación de la acera para reducir superficies expuestas, aumentar sombra y regular el viento, disminuyendo demandas energéticas.	Las fachadas continuas reducen la demanda de calefacción y refrigeración, lo que disminuye el consumo energético y las emisiones.
Contener el crecimiento del área de las ciudades para acortar desplazamientos y favorecer el transporte público y la caminata, reduciendo los viajes motorizados.	Menos viajes motorizados y uso de combustibles reducen las emisiones del transporte y de nueva infraestructura, preservan sumideros urbanos y fortalecen sistemas de transporte eficientes, disminuyendo las emisiones urbanas totales de GEI.



Recuadro 21

Carbono neutralidad y confort térmico de la vivienda (Pamela Smith y Eugenia Gayo)

En Chile, la norma térmica ha mejorado la aislación de las viviendas, elevando el confort interior y reduciendo la necesidad de calefacción en invierno, lo que, a su vez, disminuye el uso de leña, las emisiones y los costos, especialmente en el centro-sur y la zona austral del país.

Tres medidas del Plan Sectorial de Mitigación y de la Actualización del Plan de Adaptación al Cambio Climático para ciudades (2025–2030) refuerzan este camino. Destaca la implementación de la actualización de la reglamentación térmica de 2007, que amplía las zonas climáticas, incorpora nuevos componentes (ventanas, puertas y sobrecimientos) y añade criterios de ventilación, control de infiltraciones y condensación. A ello se suman programas de reacondicionamiento térmico de viviendas vulnerables y de renovación energética, orientados a reducir emisiones y mejorar la equidad.

No obstante, sin un diseño adecuado, las viviendas aisladas pueden sobrecalentarse en verano, lo que incrementa la demanda de refrigeración. Este fenómeno no solo eleva las emisiones asociadas al consumo de energía, sino que también amplifica desigualdades socioespaciales, como se observa en ciudades como Chillán (Figura 29.1). Los índices de vulnerabilidad energética territorial para verano e invierno muestran la convergencia de exposición al frío y al calor con precariedad habitacional y limitado acceso a soluciones térmicas eficientes. Por ello, resulta imprescindible avanzar desde intervenciones aisladas hacia proyectos integrados que incorporen criterios térmicos estacionales, reduzcan emisiones y fortalezcan, al mismo tiempo, el desarrollo resiliente al clima (DRC).

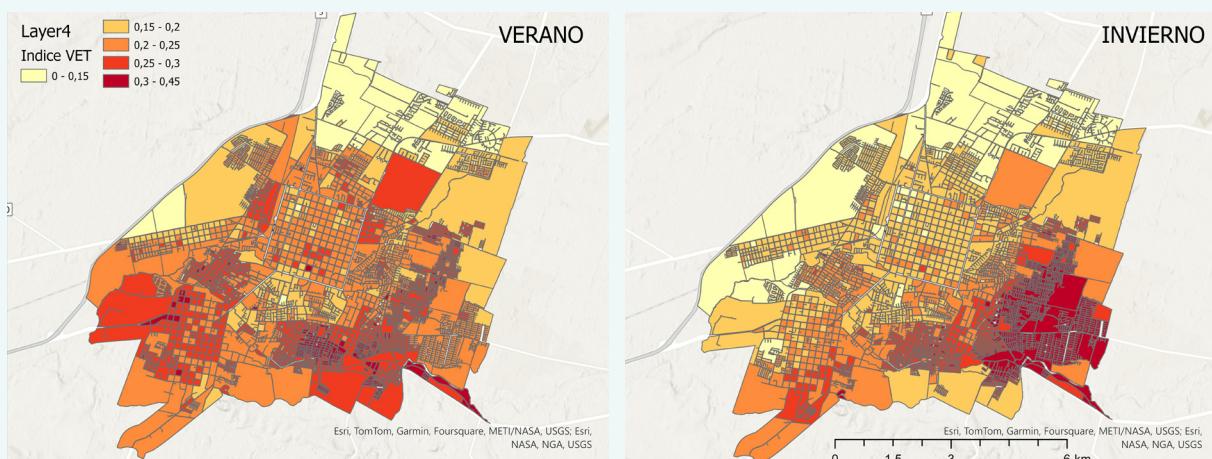


Figura 29.1: Mapas de vulnerabilidad energética territorial de Chillán para verano e invierno. Fuente: Palma et al., (2024). Índice de vulnerabilidad energética territorial (VET) en rojo, más alto, y en amarillo, más bajo.

La evidencia disponible en Chile confirma el potencial de la infraestructura verde-azul urbana como acción de mitigación-adaptación. En el Gran Santiago, por ejemplo, el arbolado urbano puede almacenar cerca de 171.000 toneladas de carbono y capturar más de 1.300 t/año, lo cual es comparable a la captura de unas 130 hectáreas de bosque nativo. Mientras que en el Gran Concepción los parques urbanos contribuyen a reducir la contaminación por material particulado fino, a almacenar carbono y a mejorar el bienestar en zonas densamente pobladas. Sin embargo, estos aportes aún no se contabilizan en el inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), lo que subestima su valor para la carbono neutralidad.

A ello se suma que la infraestructura verde urbana carece de un marco operativo que permita monitorear y verificar de manera sistemática su contribución a la mitiga-

ción-adaptación. Además, un diseño inadecuado puede generar maladaptación y externalidades, como emisiones de forzantes de contaminantes climáticos de vida corta —cuya reducción es compromiso de la NDC 2025—, un mayor consumo de calefacción en viviendas mal aisladas o la introducción de especies arbóreas de alto consumo hídrico y baja resistencia a plagas. La fuerte dependencia de especies exóticas en las ciudades chilenas también limita los beneficios climáticos, al reducir la diversidad, la captura de carbono y la capacidad de enfriamiento urbano (Chinchilla et al., 2021). Por estas razones, resulta crítico optimizar la ubicación, composición y manejo de la infraestructura verde-azul, privilegiando especies nativas y su relocalización en función de índices de vulnerabilidad energética territorial para orientar la inversión pública hacia los espacios urbanos donde los cobeneficios climáticos y sociales sean mayores.



Sección 7: Conclusiones



Conclusiones

El presente informe buscó aportar, desde la investigación interdisciplinaria y la evidencia científica, a la comprensión de los desafíos y oportunidades que enfrenta Chile en su trayectoria hacia la carbono neutralidad y el desarrollo resiliente al clima.

¿Por qué la carbono neutralidad?

El consenso científico recogido en los informes del IPCC demuestra que el cambio climático es un fenómeno global y que el control de las emisiones de GEI es indispensable para evitar mayores aumentos de temperatura. La acción climática requiere coordinación internacional y el Acuerdo de París constituye el principal marco multilateral que orienta los compromisos globales. En este contexto, numerosos países, incluido Chile, han adoptado la carbono neutralidad como meta, entendida como el balance entre emisiones y capturas.

Como meta de política multilateral, la carbono neutralidad abre rutas de transformación económica y social, mientras que el desarrollo resiliente al clima (DRC) ofrece un horizonte que integra justicia climática y bienestar humano y ecológico.

¿Por qué una meta de la Ley Marco de Cambio Climático en Chile es la carbono neutralidad y cómo se implementa?

Chile ha alineado su política climática con el Acuerdo de París, adoptando una política de Estado estructurada mediante la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC). Esta ley establece como objetivos nacionales la carbono neutralidad y la resiliencia al 2050, y define su implementación a nivel sectorial, regional y comunal.

La LMCC está en proceso de implementación y la elaboración de Planes de Acción Climática a distintos niveles muestra desafíos comunes como son fortalecer los mecanismos de monitoreo, reporte y verificación, mejorar la articulación entre niveles de gobierno y asegurar capacidades técnicas para cumplir los mandatos de la LMCC.

¿Por qué llevar una contabilidad de la carbono neutralidad?

El logro de la carbono neutralidad, en todos los niveles, necesita basar su contabilidad según lo que se incluirá y lo que no en los inventarios nacionales. Hay componentes de la biosfera que participan en el ciclo del carbono y que no se consideran o se consideran parcialmente, como los océanos y los suelos, respectivamente.

¿Qué se cuenta y qué no, considerando el funcionamiento de la biosfera?

Es relevante distinguir el ciclo del carbono y la carbono neutralidad. El ciclo del carbono es un proceso natural que sostiene la vida en la Tierra y opera en distintas escalas de tiempo, desde millones de años hasta décadas. Este ciclo regula la circulación del carbono entre la atmósfera, la biosfera, los océanos, los suelos y las rocas.

El balance de largo plazo de este ciclo está alterado por las actividades humanas que liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera, principalmente en forma de dióxido de carbono (con efectos a cientos y miles de años) y metano (que ejerce su efecto en menos de 20 años), lo que provoca el cambio climático global. La carbono neutralidad busca restituir un grado de equilibrio en el ciclo del carbono, manteniendo un balance entre lo que se emite y lo que se captura en ecosistemas terrestres y marinos, pero no incorpora por defecto la protección de los reservorios existentes, cuya degradación puede revertir los avances.

El ciclo del carbono no solo abarca emisiones y capturas, sino también reservorios donde está almacenando el carbono resultante de este balance de flujos. El resguardo de estos reservorios es relevante para garantizar el equilibrio de estos flujos; no obstante, estos no están incluidos de manera implícita en la carbono neutralidad. Chile presenta condiciones únicas en el mundo para el almacenamiento de carbono, gracias a sus bosques antiguos, bosques de macroalgas, humedales y turberas.

¿Cómo se cuantifica la carbono neutralidad en Chile?

Chile mantiene un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (INGEI) acorde con los lineamientos internacionales asociados a los compromisos del Acuerdo de París, que realiza de manera sistemática y continuada, con responsables claros en la provisión de datos y confección del inventario.

El Sistema Nacional de Inventarios es más amplio que el INGEI y permite conectar la política climática con otros objetivos de política pública que pueden ser complementarios. Los inventarios de calidad del aire, por ejemplo, permiten diseñar políticas con sinergias entre objetivos climáticos y ambientales y evaluar los cobeneficios en salud.

Sin embargo, aún se requiere desarrollar indicadores para medir la justicia climática y la equidad territorial en la acción climática, los avances y resultados de los planes mandatados por la LMCC, y los impactos y beneficios de la transición socioecológica justa.



¿Cuál es el rol de la ciencia en la cuantificación de la neutralidad de carbono?

La cuantificación de capturas y secuestros en el sector UTCUTS presenta brechas relevantes en la representatividad espacial, en los factores dinámicos que captan la variabilidad de las respuestas de las especies al clima y en las proyecciones ante el cambio climático.

Los planes de forestación masiva propuestos en las NDC implican riesgos territoriales que no han sido suficientemente documentados y podrían tener efectos no deseados en los territorios afectados.

Existen metodologías para integrar los reservorios y las proyecciones futuras de los balances de carbono. De particular interés resulta la posibilidad de mejorar la cuantificación del carbono en el suelo, además de la inclusión de modelos basados en procesos ecológicos para proyectar el futuro del carbono en nuestros bosques. Este enfoque puede ampliarse a otros ecosistemas terrestres e incluso acuáticos considerando las particularidades de estos sistemas.

¿Cómo lograr un desarrollo resiliente al clima con acción climática justa?

Desde la perspectiva del DRC, las acciones climáticas de restauración y reforestación de ecosistemas nativos, la protección y conservación de ecosistemas costeros son estrategias que potencian las capacidades para lograr la CN.

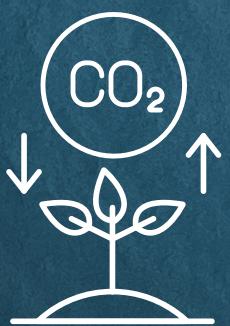
Las prácticas de manejo sustentable de suelos, paisajes y ecosistemas costeros, al comprometer a la población con acciones concretas de uso de sus recursos, son esenciales para avanzar hacia la carbono neutralidad y el DRC.

La disminución del riesgo de incendios es fundamental, dado su aporte significativo a las emisiones de carbono. Estas estrategias permiten cuidar los reservorios y ofrecen la posibilidad de acciones de desarrollo productivo con pertinencia territorial.

Los océanos y las zonas costeras pueden desempeñar un papel protagónico en la estrategia climática. La política pública puede aumentar su compromiso en esta área, desde valorizar y contabilizar su contribución a la meta de carbono neutralidad hasta desarrollar políticas de adaptación con enfoque en el DRC.

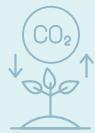
Las ciudades están comparativamente más presentes en los planes de acción climática y se reconoce su importancia en el balance de emisiones de GEI. Sin embargo, hay acciones que producen sinergias entre mitigación y adaptación que pueden profundizarse, como la gestión del arbolado urbano y el confort térmico en las viviendas. La planificación y gestión sensible al clima permiten priorizar estas soluciones.





Sección 8:
Recomendaciones





Recomendaciones

A partir de la evidencia presentada en este Informe, se entregarán recomendaciones respecto de los desafíos y oportunidades para lograr la carbono neutralidad y el desarrollo resiliente al clima en Chile, en línea con los compromisos internacionales del país y con la implementación de la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC).

La carbono neutralidad no debe entenderse solo como una meta técnica de balance de emisiones, sino también como una oportunidad para avanzar hacia un desarrollo resiliente al clima, basado en la justicia climática, la conservación y uso sustentable de los ecosistemas, participación de actores diversos y la generación de cobeneficios sociales y ambientales.

Organizaciones a las que van dirigidas: Ministerio del Medio Ambiente (Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas), Ministerio de Agricultura (Instituto Forestal, Servicio Nacional Forestal), Ministerio de Hacienda, Ministerio de Economía, Banco Central, sector privado (compañías forestales, del sector energético, empresas públicas, privadas y PYMES), organizaciones de la sociedad civil, Gobiernos regionales, municipalidades, Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, Ministerio de Energía, Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, universidades, academia, otros ministerios con competencia en la LMCC, y a la ciudadanía.

Las siguientes recomendaciones específicas no siguen un orden de prioridad. Para cada una se especifican el nivel (nacional, regional o municipal), los actores responsables y sus colaboradores. Las recomendaciones responden a la identificación de una brecha importante presentada a lo largo del informe, en la que se puede avanzar desde la colaboración y la coordinación, a fin de lograr acciones coherentes que propicien sinergias y den cumplimiento a las obligaciones de los actores.

1. Avanzar hacia un desarrollo resiliente al clima (DRC) con acción climática justa

Niveles: Nacional y subnacional

Actores responsables: Ministerio del Medio Ambiente, ministerios sectoriales, gobiernos regionales y municipales

Actores colaboradores: empresas privadas y organizaciones ciudadanas

Integrar la meta de DRC en todos los niveles de planificación climática, asegurando participación efectiva de actores diversos, incluyendo a las organizaciones de la sociedad civil, procurando la persecución de cobeneficios sociales y ambientales, de los que se pueda rendir cuenta mediante el establecimiento de indicadores y métricas para evaluar la justicia climática y los impactos de las medidas.

La carbono neutralidad puede ser un motor de transformación justa, democrática y territorialmente pertinente, que dé pie a trayectorias de desarrollo hacia paisajes sustentables y resilientes. Lo anterior requiere compatibilizar las acciones para avanzar hacia la carbono neutralidad con la mantención y aumento de la provisión de servicios ecosistémicos (agua, conservación de suelos, biodiversidad, recreación y turismo), y de bienes tales como madera y productos agropecuarios.

2. Fortalecer la gobernanza de los datos climáticos

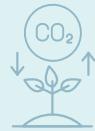
Nivel: Nacional

Actor responsable: Ministerio del Medio Ambiente

Actores colaboradores: Ministerio de Agricultura, academia

La gobernanza de los datos climáticos evidencia un importante espacio de mejora en la generación, el procesamiento, la accesibilidad y el uso de datos climáticos, por lo que se recomienda establecer responsabilidades claras, y definir estándares y protocolos orientados a la interoperabilidad, accesibilidad, participación multiactor, alineación internacional, mecanismos de verificación y desarrollo de capacidades

El sector Sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) representa el mayor desafío respecto de sofisticar sus datos, dada su naturaleza específica a las condiciones locales del ambiente, donde deben considerarse factores dinámicos asociados a la variabilidad y tendencias en la condición de bosques y plantaciones, ocurrencia de incendios y cambio climático.



La accesibilidad garantizada a los datos climáticos y ecosistémicos relacionados con la captura y emisión de GEI (por ejemplo incendios, erosión de suelos y degradación de bosques nativos) por parte de distintos actores del sector público, privado y de la sociedad, constituye una condición para la implementación de acciones climáticas efectivas, transparentes e informadas.

3. Impulsar la inclusión de reservorios en la contabilización de la carbono neutralidad

Nivel: Internacional

Actores responsables: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), Ministerio de Relaciones Exteriores, Ministerio del Medio Ambiente

Actores colaboradores: Ministerio de Agricultura, academia

Promover en instancias internacionales la necesidad de cuantificar los reservorios de carbono en bosques antiguos, turberas, humedales y bosques de macroalgas, dada la gran cantidad de carbono almacenado en ellos, y su relevancia en el balance y la gobernanza climática para países como Chile.

4. Desarrollar capacidades científico-tecnológicas en restauración y forestación

Nivel: Nacional

Actores responsables: Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento en Innovación; Ministerio de Agricultura (Instituto Forestal, Servicio Nacional Forestal)

Desarrollar e implementar capacidades científicas y tecnológicas que permitan garantizar que las acciones de restauración y forestación contribuyan efectivamente a la carbono neutralidad, resguardando la biodiversidad, la seguridad hídrica y la seguridad alimentaria.

La estrategia de forestación presenta el desafío de cumplir con el número de hectáreas comprometidas en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) para lograr la carbono neutralidad, así como también de definir cómo, dónde y con qué especies forestar. Además de la forestación, las estrategias de restauración deben asegurar que las decisiones se orienten por los principios de acción climática justa y de DRC, compatibilidad con la producción de bienes y la mantención o aumento de los servicios ecosistémicos,

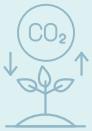
La forestación y reforestación, como estrategias para aumentar los niveles de captura de GEI en el país, también pueden ser buenas medidas de adaptación, siempre y cuando se acompañe de monitoreo y medición de los impactos de la mayor cobertura boscosa y sus efectos respecto de en los servicios ecosistémicos de los territorios (por ejemplo, provisión de agua, biodiversidad, recreación y turismo). En efecto, ciertas prácticas de forestación (dependiendo, por ejemplo, del tipo de especies y de la extensión) pueden ser nocivas en términos de adaptación. Por otra parte, la restauración de ecosistemas, a escala local y de paisaje como medida integrada de mitigación y adaptación, ofrece grandes oportunidades para compatibilizar la captura de carbono con la mantención o aumento de estos servicios ecosistémicos, y la producción de bienes, como por ejemplo, madera, productos del sector agropecuario).

5. Incorporar el riesgo de incendios en los instrumentos de planificación y gestión

Niveles: Nacional y subnacional

Actores responsables: Ministerio de Agricultura, Servicio Nacional Forestal, municipalidades, Ministerio del Medio Ambiente, Cuerpo de Bomberos, empresas forestales

Los incendios forestales representan una amenaza real capaz de alterar de manera significativa las acciones de adaptación y mitigación establecidas, por lo que se deben incorporar e implementar de manera prioritaria políticas, estrategias y acciones que prevengan, minimicen y contrarresten sus efectos en el corto y mediano plazo. La promulgación de la ley de incendios, aún en trámite legislativo en el Congreso, y la restauración a escala de paisajes, promoviendo la diversificación del mosaico vegetacional y usos de suelo, son dos iniciativas clave para disminuir el riesgo de incendios y mitigar sus impactos en un contexto de cambio climático que debieran concluir su tramitación legislativa a la brevedad para contar con un marco de respuesta claro en esta materia.



6. Establecer mecanismos robustos de monitoreo, reporte y verificación (MRV)

Niveles: Nacional y subnacional

Actores responsables: Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Agricultura (Instituto Forestal, Servicio Nacional Forestal, gobiernos regionales y municipales,

Actores colaboradores: academia y organizaciones de la sociedad civil involucradas en monitoreo ciudadano.

Desarrollar e implementar sistemas de MRV para todos los planes mandatados por la LMCC, incorporando, además de métricas de emisiones y capturas, indicadores de justicia climática y desarrollo resiliente al clima. Este es un desafío pendiente en los distintos niveles (nacional y subnacional) y constituye una condición para la transparencia, la rendición de cuentas y la participación ciudadana.

Implementación y seguimiento de acciones (lo que requiere de monitoreo, reporte y verificación) no solo en relación al logro de la carbono neutralidad, sino también respecto a la justicia de la acción climática y los impactos de las medidas. El seguimiento y la evaluación es un área por desarrollar que necesita de un diseño y trabajo colaborativo entre actores públicos y privados. La activa participación del sector académico es una oportunidad para aprovechar las capacidades, experiencia y vinculación internacional acumulada en estos temas. Se necesita desarrollar indicadores y evaluaciones *ex ante* y *ex post* de las acciones climáticas.

7. Mejorar la contabilidad y proyecciones del inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, con énfasis en el sector UTCUTS

Nivel: Nacional

Actores responsables: Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Agricultura (Servicio Nacional Forestal e Instituto Forestal)

Actores colaboradores: academia y organizaciones de la sociedad civil involucradas en monitoreo ciudadano.

Incorporar metodologías robustas de monitoreo y modelación que permitan una cuantificación integral del ciclo del carbono, incluyendo los posibles cambios en uso del suelo y ecosistemas bajo escenarios de cambio climático.

Es necesario que Chile desarrolle metodologías más sofisticadas que las actuales para cuantificar las emisiones

de GEI, de los forzantes climáticos de vida corta (FCVC), de capturas, y balance del sector UTCUTS, de acuerdo a estándares y métodos del IPCC y otras fuentes internacionales y sobre las que existe consenso respecto de su relevancia.

8. Coordinar actores para una implementación efectiva de la acción climática

Niveles: Nacional y subnacional

Actores responsables: Ministerios dentro de la LMCC, gobiernos regionales y municipales, sector privado, academia y sociedad civil

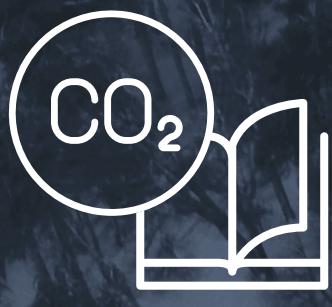
Consolidar una coordinación intersectorial y multisectorial sólida y vinculante que permita al Estado acelerar la acción climática y asegurar que las sinergias entre mitigación y adaptación se traduzcan en transformaciones concretas en los ecosistemas, paisajes y ciudades. Esta articulación institucional, guiada por la justicia climática, debe promover cambios estructurales en la forma en que se gestiona la energía, el agua y las emisiones, generando beneficios reales para las comunidades, fortaleciendo las economías locales y reforzando la legitimidad de las políticas públicas en todos los niveles territoriales.

9. Impulsar el manejo sustentable de suelos y ecosistemas

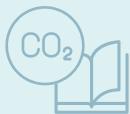
Niveles: Nacional y subnacional

Actores responsables: Ministerio del Medio Ambiente (Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas), Ministerio de Agricultura, sector privado

Fomentar prácticas de manejo sustentable de suelos y de los recursos naturales del sector silvoagropecuario que protejan los reservorios de carbono y contribuyan al equilibrio del ciclo del carbono.



Acrónimos y Glosario



Acrónimos

BNE: Balance Nacional de Energía

COP: Conferencia de las Partes

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático

CORMA: Corporación Chilena de la Madera

DRC: Desarrollo Resiliente al Clima

ECLP: Estrategia Climática de Largo Plazo

ENTSJ: Estrategia Nacional de Transición Socioecológica Justa

GEI: Gases de efecto invernadero

IFN: Inventario Forestal Nacional

INFOR: Instituto Nacional Forestal

INGEI: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático

LMCC: Ley Marco de Cambio Climático chilena (ley n° 21.455)

NDC: Contribuciones Nacionalmente Determinadas

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

PACCC: Planes de Acción Comunal de Cambio Climático

PARCC: Planes de Acción Regional de Cambio Climático

PPDA: Planes de Prevención y Descontaminación Ambiental

SNASPE: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado

SNICHILE: Sistema Nacional de Inventarios

SSP: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas

UTCUTS: Sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura

Glosario

Acción climática: Corresponde a la decisión, implementación y supervisión de acciones que se justifican en base a objetivos climáticos.

Aprendizaje profundo: Subcampo del aprendizaje automático (*Machine Learning*) que utiliza redes neuronales artificiales con múltiples capas (profundas) para modelar y aprender representaciones jerárquicas de datos. Estas redes son capaces de extraer características complejas y abstractas a partir de grandes volúmenes de información, mediante procesos de entrenamiento basados en optimización y en la capacidad de aprender de los errores..

Autoecología: Rama de la ecología que estudia las relaciones de una especie con su ambiente, analizando cómo factores abióticos (clima, suelo, agua) y bióticos (competencia, depredación) influyen en su distribución, fisiología y comportamiento.

Captura de carbono: Procesos mediante los cuales los ecosistemas absorben CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis y la formación de materia orgánica, incorporándolo en la biomasa y el suelo.

Carbono azul: Carbono capturado y almacenado por ecosistemas costeros y marinos como humedales, manglares, marismas y pastizales marinos.

Carbono neutralidad: Meta de política climática que busca alcanzar un balance entre los gases de efecto invernadero emitidos por actividades humanas y los que son capturados por ecosistemas con algún grado de manejo para que no aumente su concentración en la atmósfera.

Cero labranza: Sistema de manejo agrícola en el que no se realiza remoción mecánica del suelo antes de la siembra. En lugar de arar o voltear la tierra, los cultivos se establecen directamente sobre los residuos del cultivo anterior, utilizando herramientas de siembra especializadas.

Cobeneficios: Son los resultados de una acción climática que aporta beneficios a más de un objetivo de política pública.

Combustibles fósiles: Son fuentes de energía no renovables formadas por materia orgánica secuestrada por millones de años, por lo que tienen el elemento químico carbono (C) en su estructura. El carbono no debe confundirse con el carbón, que es uno de los combustibles fósiles, entre los que se cuentan también el petróleo y sus derivados y el gas natural.

Dióxido de carbono equivalente (CO₂eq): Unidad estandarizada en la que se contabilizan las emisiones de GEI que se registran en los inventarios nacionales, con los que se rinden los compromisos ante el Acuerdo de París.



Flujo: Movimiento o transferencia de carbono entre los distintos compartimentos del sistema terrestre. Corresponde a una tasa de intercambio, generalmente expresada en unidades de masa por área y tiempo (por ejemplo, gramos de carbono por metro cuadrado y por año).

Forzantes climáticos de vida corta: Además de los GEI, las actividades humanas emiten sustancias que tienen efectos en el clima, pero su permanencia en la atmósfera es breve (desde horas a décadas) y, en la mayoría de los casos, contaminan el aire y tienen efectos en la salud de la población. Entre ellos están los aerosoles y gases como el metano y el ozono.

Forestación: Es el proceso planificado de establecer masas forestales en terrenos que no tenían cobertura arbórea previa mediante la plantación o siembra de especies arbóreas (nativas o exóticas) con fines productivos, de restauración ecológica, protección ambiental o captura de carbono.

Gases de efecto invernadero: Son gases que se encuentran de manera natural en la atmósfera terrestre y absorben la energía térmica emitida por el sol y por la superficie de la Tierra. Los GEI irradian parte de esta energía hacia el planeta, produciendo lo que se conoce como efecto invernadero, fenómeno que ha generado una temperatura idónea para permitir la evolución de la vida en la Tierra. Si su concentración aumenta, la atmósfera sube su temperatura.

Gobernanza climática: Se entiende como la manera en que las sociedades definen objetivos y prioridades, deciden acciones climáticas, implementan y supervisan estas acciones, que se toman para hacerse cargo de las causas y consecuencias del cambio climático. La gobernanza involucra a diversos actores, entre ellos el Estado, la sociedad civil, la academia y el sector privado, y se da a distintos niveles (internacional, nacional y local).

Humedales: Ecosistemas en los que el suelo permanece saturado de agua durante períodos prolongados, generando condiciones anaeróbicas (sin oxígeno libre) que influyen en la formación de suelos orgánicos, donde predomina la acumulación de materia orgánica y se desarrollan procesos clave para el ciclo del agua y del carbono.

Inventarios de emisiones de GEI: Son registros que tabulan tanto las emisiones a la atmósfera como las capturas de GEI —que se consideran como emisiones negativas—. Los inventarios son la base para los compromisos climáticos, el diseño de estrategias y de políticas públicas y para rendir cuentas respecto de los resultados de la acción climática.

Labranza de conservación: Es un conjunto de prácticas agrícolas orientadas a reducir la alteración mecánica del suelo y mantener una cobertura vegetal o de residuos sobre la superficie.

Labranza tradicional: Es el sistema agrícola que implica la remoción mecánica intensiva del suelo antes de la siembra, generalmente mediante arado y rastra.

Labranza vertical: Sistema de preparación del suelo que busca aflojarlo en profundidad sin voltearlo, utilizando implementos especializados.

Manejo forestal estratégico: Concebido a escala de rodal y paisaje, incorpora mezcla de especies, edades y densidades, establece rodales de menor tamaño (menos de 50 hectáreas) y promueve plantaciones mixtas y multi-propósito, incluidos sistemas silvopastorales.

Manglares: Ecosistemas costeros formados por árboles y arbustos adaptados a vivir en zonas intermareales, donde el suelo está saturado de agua salada o salobre.

Marismas: Humedal costero ubicado en zonas de desembocadura de ríos y costas bajas, sujeto a inundaciones periódicas a causa de las mareas, donde se mezclan aguas marinas y continentales. En él predominan densos parches de plantas resistentes a la sal, como hierbas, pastos o arbustos bajos.

Permafrost: Se refiere a cualquier material del subsuelo (suelo, sedimento o roca) que permanece a una temperatura igual o inferior a 0 °C durante al menos dos años consecutivos. Este material puede contener hielo, agua líquida, gases y materia orgánica. No depende de la presencia de hielo, sino de la condición térmica estable.

Renovales de bosque: Formaciones vegetales originadas por la regeneración natural de un bosque nativo tras una perturbación, como la tala, el incendio o el aprovechamiento selectivo. Se caracterizan por la presencia de árboles jóvenes que conforman una masa forestal en crecimiento.

Reservorio aéreo: Biomasa vegetal que almacena carbono y nutrientes en la parte superior del suelo, principalmente en tallos, ramas, hojas y frutos.

Reservorios de carbono: Un reservorio de carbono es cualquier sistema natural o artificial que captura y almacena carbono en diversas formas químicas (orgánicas e inorgánicas) durante períodos variables de tiempo. Estos reservorios son componentes esenciales del ciclo biogeoquímico del carbono, regulando el intercambio de carbono entre la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera y la litosfera, y desempeñan un papel crucial en la estabilidad climática del planeta.

Rodales: Unidad básica de manejo forestal que corresponde a un conjunto de árboles que crecen en condiciones relativamente homogéneas, ya sea por edad, especie, densidad, estructura o características del sitio.



Secuestro de carbono: proceso mediante el cual el carbono atmosférico (principalmente en forma de CO₂) se captura y almacena en reservorios naturales o artificiales, evitando su liberación a la atmósfera y contribuyendo a mitigar el cambio climático.

Sumideros de carbono: Es cualquier sistema natural o artificial que absorbe más carbono del que emite, reduciendo la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Estos sumideros almacenan carbono en forma de biomasa, materia orgánica o compuestos inorgánicos durante períodos variables.

Trayectorias Socioeconómicas Compartidas: Corresponden a escenarios futuros construidos para entender cómo las tendencias demográficas, económicas, de uso del suelo, tecnológicas y culturales son determinantes en el nivel de emisiones de GEI que se alcanza y condicionan la capacidad de mitigar y adaptarse. Estas trayectorias no son predicciones, sino posibles opciones de desarrollo.

Turberas: Ecosistema donde se acumula material orgánico formado por restos vegetales parcialmente descompuestos en condiciones de saturación de agua y baja disponibilidad de oxígeno (turba). Estas condiciones ralentizan la descomposición, lo que permite que grandes cantidades de carbono se almacenen en el suelo durante miles de años.

Turberas antropogénicas: Ecosistemas de turba formados o modificados por actividades humanas, generalmente como resultado de prácticas agrícolas, forestales o de drenaje en zonas húmedas.



Este informe ofrece una contribución decisiva para comprender que la carbono neutralidad no es solo una meta climática, sino una transformación profunda de nuestras trayectorias de desarrollo. Al articular ciencia, gobernanza y territorio, el CR2 logra situar el debate donde realmente pertenece: en cómo redefinimos nuestra estructura económica, nuestras instituciones y las oportunidades de bienestar para las comunidades. Su valor radica en mostrar que la evidencia científica no es un insumo accesorio, sino un pilar institucional esencial para tomar decisiones justas, transparentes y coherentes con los desafíos del siglo XXI. El énfasis en la gobernanza de datos, la justicia climática y la escala territorial ofrece una hoja de ruta para orientar inversiones, políticas y capacidades públicas. Este informe no solo ilumina lo que debemos hacer, sino cómo hacerlo: con rigor, con visión y con la convicción de que el desarrollo resiliente al clima es, ante todo, una decisión sobre el tipo de país que queremos construir.

Ignacio Araya Areyuna
MSc Climate Change, Development and Policy.

Este informe abre un oportunidad de lucidez en un debate político y técnico sobre la acción climática que ha tendido, en las políticas públicas, las negociaciones internacionales y las comunicaciones, cuando no al negacionismo, a la extrema carbono-contabilidad, el impulso de falsas soluciones y el predominio de los intereses corporativos, alejándose de la realidad compleja y multidimensional que enfrentan comunidades, ecosistemas, países y el planeta todo. En tiempos difíciles para la humanidad y la naturaleza en Chile y el mundo, el CR2 ofrece una mirada que, sin abandonar la nomenclatura y el instrumental oficial, abre espacios para una aproximación sistémica y estructural de la propia crisis y su solucionática.

Desde los movimientos de justicia climática somos escépticos de la carbono neutralidad, no como resultado aritmético de una resta entre supuestas emisiones y supuestas capturas de carbono, sino como eje central de la acción climática, que por su simplicidad y la velocidad e intensidad de las soluciones que promueve (por el lado de las emisiones y el de las capturas), orientadas a mantener los patrones insostenibles de producción (principalmente extractivista) y consumo (superfluo), puede retrasar y/o anular los objetivos del equilibrio en el ciclo de carbono, pero también y sobre todo del bienestar social y natural expresado en la resiliencia climática y el equilibrio ecológico.

El informe muestra caminos, como el Desarrollo Resiliente al Clima, que expresados en indicadores, programas y normativas, pueden ayudar (si no ahora, en el futuro) a un cambio de rumbo en las políticas públicas y al propio CR2 a profundizar en los componentes sociales, económicos, políticos y culturales de la crisis sistémica.

Eduardo Giesen
Colectivo VientoSur
Coordinador América Latina y el Caribe, Campaña Global para exigir Justicia Climática.

Referencias de la Sección 1

- Barragán, J. M., & De Andrés, M. (2016). Expansión urbana en las áreas litorales de América Latina y Caribe. *Revista de Geografía Norte Grande*, (64), 129-149.
- BID. (2024). Toward enhanced climate ambition: Transparency and digital governance in Latin America and the Caribbean (No. 10.18235/0012899, p. 80). *Inter-American Development Bank*. <https://doi.org/10.18235/0012899>
- Boretto, G. M., Rouzaut, S., Cioccale, M., Gordillo, S., & Benítez, Y. (2018). Dinámica costera y antropización en playas uruguayas. Un análisis integrado para su conservación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(3), 291-306.
- Comité Oceanográfico Nacional (CONA). (2022). *Estado del conocimiento oceanográfico nacional*. Comité Oceanográfico Nacional.
- Dittmer, K. M., Wollenberg, E., Cohen, M., & Egler, C. (2023). How good is the data for tracking countries' agricultural greenhouse gas emissions? Making use of multiple national greenhouse gas inventories. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1156822. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1156822>
- Engvall, T. S., & Flak, L. S. (2022). The state of information infrastructure for global climate governance. *Transforming Government: People, Process and Policy*, 16(4), 436-448. <https://doi.org/10.1108/TG-05-2022-0064>
- Gattuso, J. P., Houllier, F., Butel, M., & Sanchez, W. (2025). Ocean Science Meets Diplomacy: Contribution of the One Ocean Science Congress to the Third United Nations Ocean Conference. *Limnology and Oceanography Bulletin*.
- Grassi, G., Conchedda, G., Federici, S., Abad Viñas, R., Korosuo, A., Melo, J., Rossi, S., Sandker, M., Somogyi, Z., Vizzarri, M., & Tubiello, F. N. (2022). Carbon fluxes from land 2000–2020: Bringing clarity to countries' reporting. *Earth System Science Data*, 14(10), 4643–4666. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4643-2022>
- Grinspan, D., & Worker, J. (2021). *Implementing open data strategies for climate action: Suggestions and lessons learned for government and civil society stakeholders*. World Resources Institute. <https://doi.org/10.46830/wriwp.19.00093>
- Guevara-Cue, G. (2025). Climate justice: A view from the Latin American context. *Environmental Science & Policy*, 171, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104156>
- Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3), 965–1039. <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>
- Guevara-Cue, G. (2025). Climate justice: A view from the Latin American context. *Environmental Science & Policy*, 171, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104156>
- Hoegh-Guldberg, O., et al. (2019). *The ocean as a solution to climate change: Five opportunities for action* [Report]. World Resources Institute. <https://doi.org/10.69902/332b8e08>
- Hayes, M. H., & Clapp, C. E. (2001). Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science*, 166(11), 723-737.
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., ... & Simpson, S. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(1), 42-50.
- Howard, J., Sutton-Grier, A. E., Smart, L. S., Lopes, C. C., Hamilton, J., Kleypas, J., Simpson, S., McGowan, J., Pessarrodona, A., Alleway, H. K., & Landis, E. (2023). Blue carbon pathways for climate mitigation: Known, emerging and unlikely. *Marine Policy*, 156, 105788. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105788>
- Ibarra, C. & Orellana, P., coords., varios colaboradores. (2025). Observaciones al Anteproyecto de actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por su sigla en inglés) de Chile en 2025. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. <https://www.cr2.cl/observaciones-del-cr2-a-la-contribucion-nacionalmente-determinada-ndc/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai,

- A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer, Eds.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- Laganière, J., Angers, D. A., & Paré, D. (2009). Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 16(1), 439–453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x>
- Mai, L., & Elsässer, J. P. (2022). Orchestrating global climate governance through data: The UNFCCC Secretariat and the Global Climate Action Platform. *Global Environmental Politics*, 22(4), 151–172. https://doi.org/10.1162/glep_a_00667
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Muñoz, F. (2025). Gobernanza de datos climáticos: Conectando datos para la acción climática (Policy Brief CR2 No. 24). <https://www.cr2.cl/policy-brief-cr2-gobernanza-de-datos-climaticos-conectando-datos-para-la-accion-climatica/>
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (Eds.). (2009). *Blue carbon: The role of healthy oceans in binding carbon*. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7772>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Open Government Partnership (OGP). (2024). Open Gov Guide 2024—Climate and Environment—Open Climate Data (p. 14). <https://www.opengovpartnership.org/es/documents/open-gov-guide-2024/>
- PARIS21. (2022). *Envisioning a climate change data ecosystem: A path to co-ordinated climate action*. Secretariat of the Partnership in Statistics for Development in the 21st Century. <https://www.paris21.org/knowledge-base/envisioning-climate-change-data-ecosystem-path-co-ordinated-climate-action>
- Rawls, J. (1971). *A theory of justice*. Harvard University Press.
- Reed, C. C., Merrill, A. G., Drew, W. M., Christman, B., Hutchinson, R. A., Keszey, L., ... & Sullivan, B. W. (2021). Montane meadows: a soil carbon sink or source?. *Ecosystems*, 24(5), 1125–1141.
- Schipper, E.L.F., A. Revi, B.L. Preston, E.R. Carr, S.H. Eriksen, L.R. Fernandez-Carril, B.C. Glavovic, N.J.M. Hilmi, D. Ley, R. Mukerji, M.S. Muylaert de Araujo, R. Perez, S.K. Rose, and P.K. Singh, 2022: Climate Resilient Development Pathways. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2655–2807, doi:10.1017/9781009325844.027.
- Schletz, M., Hsu, A., Robiou Du Pont, Y., Durkin, L., Yeo, Z. Y., & Wainstein, M. (2022). Climate data need shared and open governance. *Nature*, 610(7930), 34. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-03123-7>
- Schlosberg, D. (2007). *Defining environmental justice: Theories, movements, and nature*. Oxford University Press.
- Stevis, D. (2021). The globalization of Just Transition in the world of labour: The politics of scale and scope. *Tempo Social*, 33(2), 57–77.
- Tang, C., Yang, F., & Antonietti, M. (2022). Carbon materials advancing microorganisms in driving soil organic carbon regulation. *Research*.
- Vaidula, M., & Hood, C. (2018). *Accounting for baseline targets in NDCs: Issues and options for guidance* (OECD/IEA Climate Change Expert Group Papers No. 2018/02). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9ae65cc1-en>
- Verhulst, S. (2024). *The need for climate data stewardship: 10 tensions and reflections regarding climate data governance*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.18107>
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., ... & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149–162.
- Open North. (2023). *Data governance: The missing piece in the climate action puzzle* (p. 11). Open North. <https://opennorth.ca/resources/data-governance-the-missing-piece-in-the-climate-action-puzzle/>

Referencias de la Sección 2:

- Araya López, A., & Messuto, D. (2023). *Humedales costeros como sumideros de carbono azul*. Ministerio del Medio Ambiente – Proyecto GEF Humedales Costeros. <https://gefhumedales.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/05/Estudio-Humedales-costeros-como-sumideros-de-carbono-azul.pdf>

- Cabezas, J., Galleguillos, M., Valdés, A., Fuentes, J. P., Pérez, C., & Pérez-Quezada, J. F. (2015). Evaluation of impacts of management in an anthropogenic peatland using field and remote sensing data. *Ecosphere*, 6(12), 1-24. <https://doi.org/10.1890/es15-00232.1>
- Canadell, J. G., Monteiro, P. M. S., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Queguiner, B., & Schwinger, J. (2021). Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *IPCC AR6 Working Group I – Chapter 5*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>
- CenCO2PIP. (2023) The Cenozoic CO₂ Proxy Integration Project (CenCO2PIP) Consortium. Toward a Cenozoic history of atmospheric CO₂. *Science*, 382, 1-10. <https://doi.org/10.1126/science.adf5177>
- Cotrufo, M. F., & Lavallee, J. M. (2022). Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *Advances in Agronomy*, 172, 1-66. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>
- Fajardo, A., Gazol, A., Mayr, C., & Camarero, J. J. (2019). Recent decadal drought reverts warming-triggered growth enhancement in contrasting climates in the southern Andes tree line. *Journal of Biogeography*, 46, 1367-1379.
- Eyring, V., Gillett, N. P., Achuta Rao, K. M., Barimalala, R., Barreiro Parrillo, M., Bellouin, N., Cassou, C., Durack, P. J., Kosaka, Y., McGregor, S., Min, S., Morgenstern, O., and Sun, Y. (2021). Human Influence on the Climate System. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 423-552, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.005>.
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., and Zhang, H. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923-1054, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>.
- Forster, P. M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Cassou, C., Hauser, M., Hausfather, Z., Lee, J.-Y., Palmer, M. D., von Schuckmann, K., Slangen, A. B. A., Szopa, S., Trewin, B., Yun, J., Gillett, N. P., Jenkins, S., Matthews, H. D., Raghavan, K., Ribes, A., Rogelj, J., Rosen, D., Zhang, X., Allen, M., Aleluia Reis, L., Andrew, R. M., Betts, R. A., Borger, A., Broersma, J. A., Burgess, S. N., Cheng, L., Friedlingstein, P., Domingues, C. M., Gambarini, M., Gasser, T., Güttschow, J., Ishii, M., Kadow, C., Kennedy, J., Killick, R. E., Krummel, P. B., Liné, A., Monselesan, D. P., Morice, C., Mühlé, J., Naik, V., Peters, G. P., Pirani, A., Pongratz, J., Minx, J. C., Rigby, M., Rohde, R., Savita, A., Seneviratne, S. I., Thorne, P., Wells, C., Western, L. M., van der Werf, G. R., Wijffels, S. E., Masson-Delmotte, V., and Zhai, P. (2025). Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence, *Earth Syst. Sci. Data*, 17, 2641-2680, <https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshakl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., ... Zeng, J. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3), 965-1039. <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>
- González de Andrés, E., Suárez, M., Querejeta, J., & Camarero, J. (2021). Chronically low nutrient concentrations in tree rings are linked to greater tree vulnerability to drought in *Nothofagus dombeyi*. *Forests*, 12(9), 1-19. <https://doi.org/10.3390/f12091180>
- González, M. E., Lara, A., Urrutia-Jalabert, R., Bustos-Salazar, A., Ruiz-Gómez, C., & Aravena, J. C. (2022). Carbon stocks across different environments, disturbance regimes, and stand age in *Fitzroya cupressoides* forests, the longest-lived species of the southern hemisphere. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 960429. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.960429>
- Guzmán-Marín, R., He, M., Rossi, S., Rodríguez, C. G., Urrutia-Jalabert, R., & Lara, A. (2024). Growth decline and wood anatomical traits in *Nothofagus dombeyi* populations along a latitudinal gradient in the Andes, Chile. *Trees*, 38(6), 1443-1457. <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02564-z>
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.

- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9, 737–742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Lee, C.-T. A., Jiang, H., Dasgupta, R., & Torres, M. (2019). A Framework for Understanding Whole-Earth Carbon Cycling. In B. N. Orcutt, I. Daniel, & R. Dasgupta (Eds.), Deep Carbon: Past to Present (pp. 313–357). chapter, Cambridge: Cambridge University Press.
- Lovelock, C. E., & Reef, R. (2020). Variable impacts of climate change on blue carbon. *One Earth*, 3(2), 195–211. [https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322\(20\)30354-7](https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(20)30354-7)
- Marquet, P. A., Rojas, M., Stehr, A., Farías, L., González, H., Muñoz, J. C., Wagemann, E., Rojas, C., Rodríguez, I., & Hoyos, J. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza*. Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5736938>
- Mora-Soto, A., Palacios, M., Macaya, E. C., Gómez, I., Huovinen, P., Pérez-Matus, A., Young, M., Golding, N., Toro, M., Yaqub, M., & Macias-Fauria, M. (2020). A high-resolution global map of giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) forests and intertidal green algae (*Ulvophyceae*) with Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 12(4), 694. <https://doi.org/10.3390/rs12040694>
- Naylor, D., Sadler, N. C., Bhattacharjee, A., Graham, E. B., Anderton, C. R., McClure, R., ... Jansson, J. K. (2020). Soil microbiomes under climate change and implications for carbon cycling. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 9.1–9.31. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-082720>
- Pacheco-Cancino, P. A., Carrillo-López, R. F., Riquelme-Belmar, J. A., & Somos-Valenzuela, M. A. (2025). Impacts of different intensities of commercial *Sphagnum* moss extraction on CO₂ fluxes in a northern Patagonia peatland. *The Science Of The Total Environment*, 964, 178566. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178566>
- Paul, E. A. (2015). Soil microbiology, ecology, and biochemistry (4th ed.). Academic Press.
- Pérez-Quezada, J. F., Olgún, S., Fuentes, J. P., & Galleguillos, M. (2015). Tree carbon stock in evergreen forests of Chiloé, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 36(1), 27–39. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002015000100004>
- Pérez-Quezada, J. F., Celis-Diez, J. L., Brito, C. E., Gaxiola, A., Nuñez-Avila, M., Pugnaire, F. I., & Armesto, J. J. (2018). Carbon fluxes from a temperate rainforest site in southern South America reveal a very sensitive sink. *Ecosphere*, 9(4). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2193>
- Pérez-Quezada, J. F., Moncada, M., Barrales, P., Urrutia-Jalabert, R., Pfeiffer, M., Herrera, A. F., & Sagardía, R. (2023). How much carbon is stored in the terrestrial ecosystems of the Chilean Patagonia? *Austral Ecology*, 48(5), 893–903. <https://doi.org/10.1111/aec.13331>
- Querejeta, J. I., Ren, W., & Prieto, I. (2021). Vertical decoupling of soil nutrients and water under climate warming reduces plant cumulative nutrient uptake, water-use efficiency and productivity. *New Phytologist*, 230(4), 1378–1393. <https://doi.org/10.1111/nph.17258>
- Quiros, T. E. A. L., Sudo, K., Ramilo, R. V., Garay, H. G., Soniega, M. P. G., Baloloy, A., Blanco, A., Tamondong, A., Nadaoka, K., & Nakaoka, M. (2021). Blue carbon ecosystem services through a vulnerability lens: Opportunities to reduce social vulnerability in fishing communities. *Frontiers in Marine Science*, 8, 671753. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671753>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Schellnhuber, H. J., Dube, O. P., Dutreuil, S., Lenton, T. M., and Lubchenco, J., (2020). The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 54–63, <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0005-6>.
- Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Berntsen, T., Collins, W. D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler-Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., and Zanis, P. (2021). Short-Lived Climate Forcers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 817–922, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.008>.
- Urrutia-Jalabert, R., Malhi, Y., Barichivich, J., Lara, A., Delgado-Huertas, A., Rodríguez, C. G., & Cuq, E. (2015). Increased water use efficiency but contrasting tree growth patterns in *Fitzroya cupressoides* forests of southern Chile during recent decades. *Journal Of Geophysical Research Biogeosciences*, 120(12), 2505–2524. <https://doi.org/10.1002/2015jg003098>
- Urrutia-Jalabert, R., Barichivich, J., Rozas, V., Lara, A., Rojas, Y., Bahamondez, C., Rojas-Badilla, M., Gipoulou-Zuñiga, T., & Cuq, E. (2021). Climate response and drought resilience of *Nothofagus obliqua* secondary forests across a latitudinal gradient in south-central Chile. *Forest Ecology And Management*, 485, 118962. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118962>

- Valdés-Barrera, A., Kutzbach, L., Celis-Diez, J. L., Armesto, J. J., Holl, D., & Perez-Quezada, J. F. (2019). Effects of disturbance on the carbon dioxide balance of an anthropogenic peatland in northern Patagonia. *Wetlands Ecology And Management*, 27(5-6), 635-650. <https://doi.org/10.1007/s11273-019-09682-3>
- Venegas-González, A., Juñent, F. R., Gutiérrez, A. G., & Filho, M. T. (2018). Recent radial growth decline in response to increased drought conditions in the northernmost *Nothofagus* populations from South America. *Forest Ecology and Management*, 409, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.006>
- Walker, J. C. G., Hays, P. B., and Kasting, J. F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature, *J. Geophys. Res.*, 86(C10), 9776-9782, <https://doi.org/10.1029/JC086IC10p09776>.
- Wu, S., Shao, Z., Andrew, R. M., Bing, L., Wang, J., Niu, L., Liu, Z., & Xi, F. (2024). Global CO₂ uptake by cement materials accounts 1930–2023. *Scientific Data*, 11, Article 1409. <https://www.nature.com/articles/s41597-024-04234-8>

Referencias de la Sección 3:

- Álvarez, C., Pucheta, M., & Bertranou, C. (2019). *La dimensión social de la transición justa en las experiencias europeas: retos y buenas prácticas para Chile y América Latina. Un estudio comparado*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/68575-la-dimension-social-la-transicion-justa-experiencias-europeas-retos-buenas>
- Adaptation Committee. (2020). *Information paper on linkages between mitigation and adaptation* (AC/2020/9). United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/ac17_8b_ada_miti.pdf
- Billi, M., Moraga, P., Aliste, E., Maillet, A., O’Ryan, R., Sapiains, R., Bórquez, R., et al. (2021). *Gobernanza climática de los elementos: Hacia una gobernanza climática del agua, el aire, el fuego y la tierra en Chile, integrada, anticipatoria, socio-ecosistémica y fundada en evidencia* (69 pp.). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² (ANID/FONDAP/15110009). <https://www.cr2.cl/gobernanza-elementos/>
- Cisterna, P. (2022). *Transición Justa. Informe Comisiones de Transición Justa*. Rumbo Colectivo y Fundación Heinrich Böll Stiftung. Santiago, Chile.
- Chirambo, D. (2020). The emerging threats and opportunities for implementing nationally determined contributions (NDCs) and sustainable development goal 7: Policy insights from Sub-Saharan Africa and Malawi. *The Central European Review of Economics and Management*, 4(3), 23–52.
- Fischer-Kowalski, M., Haas, W., & Wiedenhofer, D. (2012). *Socio-ecological transitions: Definition, dynamics and related global scenarios*. NEUJOBS Project. http://projects.mcrit.com/foresightlibrary/attachments/Socio_ecological_transitions_and_global_scenarios.pdf
- Flores, C., Maillet, A., Cariaga-Cerda, V., Hernández-González, M., Huenante, N., Martínez, F., & Yáñez-Abad, P. (2019). Policy brief | Análisis del modelo de participación adoptado en materia ambiental. Observatorio de la Ley de Cambio Climático. <https://tipg.link/NPDt>
- Grafakos, S., Trigg, K., Landauer, M., Chelleri, L., & Dhakal, S. (2019). Analytical framework to evaluate the level of integration of climate adaptation and mitigation in cities. *Climatic Change*, 154(1–2), 87–106. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02394-w>
- Heras, A., & Gupta, J. (2024). Fossil fuels, stranded assets, and the energy transition in the Global South: A systematic literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 15(1), e866. <https://doi.org/10.1002/wcc.866>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Glosario, Sexto Informe de Evaluación (AR6). <https://apps.ipcc.ch/glossary/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Summary for policymakers. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, ... B. Rama (Eds.). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. 22). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Qi, J., & Terton, A. (2022). Addressing climate change through integrated responses: Linking adaptation and mitigation (Policy brief). IISD. <https://www.iisd.org/system/files/2022-03/climate-change-linking-adaptation-mitigation.pdf>
- Ley N° 21.455. (2022). Ley Marco de Cambio Climático (13 de junio de 2022). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>
- Maillet, A., Orrego-Méndez, G., Pogorelow, B., Espíndola-Vergara, L., Ibarra, C., Osorio, C., Fernández, G., Saa Vidal, R. & Palacios Cerón, L. (2025). Desafíos de la acción climática local: El caso de la formulación de los planes de acción comunal de cambio climático en Chile. *Revista de Gestión Pública*, 14(1), 37–58. <https://revistas.uv.cl/index.php/rgp/article/view/4724/4839>
- Ministerio de Energía. (2024). Plan de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático de Energía. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/proyecto_definitivo_plan_sectorial_energia_13_dic.pdf

- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2023). Reglamento que establece procedimientos asociados a los instrumentos de gestión del cambio climático (Decreto Supremo N.º 26). Diario Oficial de la República de Chile, 6 de junio de 2023. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1199418>
- Moraga, P., Hervé, D., Delgado, V., Morales, B., Silva, M. I., & Jiménez, G. (2020). *Identificación de reformas legales para alcanzar la meta de carbono neutralidad en Chile al 2050: Informe final*. Observatorio Ley de Cambio Climático; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Facultad de Derecho, Universidad de Chile. <https://leycambioclimatico.cl/wp-content/uploads/2020/04/Informe-Reformas-Legales-para-alcanzar-la-carbono-neutralidad.pdf>
- Moraga, P. (2024). La implementación de un nuevo modelo de gobernanza para la acción climática: A dos años de la dictación de la Ley Marco de Cambio Climático en Chile. *Revista de Derecho Ambiental*, 1(21). <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2024.75083>
- Moraga, P., & Salinas, E. (2025). *Análisis CR2: A tres años de la publicación de la Ley Marco de Cambio Climático. Evaluación del contenido de los Planes Sectoriales de Cambio Climático: ¿Cómo se están cumpliendo los estándares legales y reglamentarios?*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-a-tres-anos-de-la-publicacion-de-la-ley-marco-de-cambio-climatico-evaluacion-del-contenido-de-los-planes-sectoriales-de-cambio-climatico-como-se-estan-cumpliendo-los-estandares/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2021). *Strengthening adaptation-mitigation linkages for a low-carbon, climate-resilient future* (OECD Environment Policy Paper No. 23). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/6d79ff6a-en>
- Panez Pinto, A., Bolados García, P., Espinoza Almonacid, L., & Jerez Henríquez, B. (2023). Zonas de sacrificio y recuperación socioambiental en Chile: Fallas y oportunidades de la política ambiental. *Ambiente & Sociedade*, 26. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0137r1vu2023l3ao>
- Rabí, V., Pino, F., Fontecilla, F. (2021). *Transición Justa en Latinoamérica: De la descarbonización a la transformación*. Proyecto Transición Justa en Latinoamérica (TJLA), Coordinado por ONG CERES, CEUS Chile, y ONG FIMA. Santiago, Chile.
- Sapiains, R., Ibarra, C., Jiménez, G., O’Ryan, R., Blanco, G., Moraga, P., & Rojas, M. (2021). Exploring the contours of climate governance: An interdisciplinary systematic literature review from a southern perspective. *Environmental Policy and Governance*, 31(1), 46–59. <https://doi.org/10.1002/eet.1912>
- Singh, C., Ford, J., Ley, D., Bazaz, A., & Revi, A. (2020). Assessing the feasibility of adaptation options: Methodological advancements and directions for climate adaptation research and practice. *Climatic Change*, 162(2), 255–277. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02762-x>
- Tàbara, J. D. (2020). Sustainable climate development: Transforming goals into means. In K. Bachmann, M. Batinge, & M. Milkoreit (Eds.), *Transformative climate governance: A capacities perspective to systematise, evaluate and guide climate action* (pp. 419–430). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49007-1_25
- Tepual Conservación. (2025). Asistencia técnica para el componente de integración de acciones de adaptación y mitigación al cambio climático (Informe final). Initiative for Climate Action Transparency (ICAT). https://climateactiontransparency.org/wp-content/uploads/2025/12/ICAT_Entregable-9_vf_2.0-1.pdf

Referencias de la Sección 4:

- Álamos, N., Huneeus, N., Opazo, M., Osses, M., Puja, S., Pantoja, N., Denier van der Gon, H., Schueftan, A., Reyes, R., & Calvo, R. (2022). High-resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining and residential activities in Chile. *Earth System Science Data*, 14, 361–379. <https://doi.org/10.5194/essd-14-361-2022>
- Alonso, M. F., Longo, K. M., Freitas, S. R., da Fonseca, R. M., Marécal, V., Pirre, M., & Gallardo Klenner, L. (2010). An urban emissions inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales. *Atmospheric Environment*, 44(39), 5072–5083. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.013>
- Barragán, J., & de Andrés, M. (2016). Expansión urbana en las áreas litorales de América Latina y Caribe. *Revista de Geografía Norte Grande*, 64, 129–149. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000200009>
- Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A. M., & Gallardo, L. (2017). Temporal evolution of main ambient PM2.5 sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10093–10107. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10093-2017>
- Billi, M., Moraga, P., Aliste, E., Maillet, A., O’Ryan, R., Sapiains, R., Bórquez, R., et al. (2021). *Gobernanza climática de los elementos: Hacia una gobernanza climática del agua, el aire, el fuego y la tierra en Chile, integrada, anticipatoria, socio-ecosistémica y fundada en evidencia* (69 pp.). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) (ANID/FONDAP/15110009). <https://www.cr2.cl/gobernanza-elementos/>

BID. (2024). *Toward Enhanced Climate Ambition: Transparency and Digital Governance in Latin America and the Caribbean* (Bravo, S., Doherty-Bigara, J., & Restrepo Duarte, D.). Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0012899>

Bórquez, R., Alonso, C., Billi, M., Azócar, G., Sapiains, R., Blanco, G., Moraga, P., & Maillet, A. (2024). Hacia una gobernanza climática integrada: Aportes de la academia a las políticas públicas y generación de conocimientos. En A. Ocampo-Melgar & A. Urquiza (Eds.), *Estudio de la gestión adaptativa en Chile: Descubriendo elementos para la resiliencia* (pp. 18–46). Universidad de Chile, Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo. <https://doi.org/10.34720/rtpf-7h40>

Boretto, G. M., Rouzaut, S., Cioccale, M., Gordillo, S., & Benítez, Y. (2018). Dinámica costera y antropización en playas uruguayas: Un análisis integrado para su conservación. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 291–306. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.865>

Bowman, D., Moreira, A., Kolden, C., Chávez, R., Muñoz, A., Salinas, F., González, A., Rocco, R., Barrera, F., Williamson, G., Borchers, N., Cifuentes, L., Abatzoglou, J., & Johnston, F. (2018). Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio*, 48(1), 350–362. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1084-1>

Clerc, J. (2020). *Estudio escenarios de usos futuros de la electricidad: Capítulos transporte y residencial*. E2BIZ Consultores para Generadoras de Chile. <https://generadoras.cl/wp-content/uploads/2025/01/es9.pdf>

CONAF. (2023). *Ocurrencia y daño de incendios de magnitud 1985-2023*. Corporación Nacional Forestal. <https://www.conaf.cl/centro-documental/ocurrencia-y-dano-de-incendios-de-magnitud-1985-2023/>

Comité Oceanográfico Nacional (CONA). (2022). *Estado del conocimiento oceanográfico nacional*. CONA.

Engvall, T. S., & Flak, L. S. (2022). The state of information infrastructure for global climate governance. *Transforming Government: People, Process and Policy*, 16(4), 436–448. <https://doi.org/10.1108/TG-05-2022-0064>

Gallardo, L., Escribano, J., Dawidowski, L., Rojas, N., de Fátima Andrade, M., & Osses, M. (2012). Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo. *Atmospheric Environment*, 47, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.051>

Gallardo, L., Basoa, K., Tolvett, S., Osses, M., Huneeus, N., Bustos, S., Barraza, J., & Ogaz, G. (Eds.). (2020). *Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile: Resumen para tomadores de decisión*. Centro de

Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Ministerio del Medio Ambiente, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) & SNAP Initiative. https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/04/Mitigacion_carbono_negro_NDC_Chile2020.pdf

Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D. A., Galleguillos, M., Le Quesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-191>

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., & Sepúlveda, H. H. (2019). The Central Chile megadrought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 39(12), 3737–3751. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

González, M. E., Galleguillos, M., Lopatin, J., Leal, C., Becerra-Rodas, C., Lara, A., & San Martín, J. (2022). Surviving in a hostile landscape: Nothofagus alessandrii remnant forests threatened by megafires and exotic pine invasion in the coastal range of central Chile. *Oryx*. <https://doi.org/10.1017/S0030605322000102>

González, M. E., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R., & Díaz-Hormazábal, I. (2018). The 2010–2015 megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(8), e02300. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2300>

González, M. E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., Vásquez, F., Lara, A., Aldunce, P., Delgado, V., Arriagada, J., Ugarte, A. M., Sepúlveda, A., Fariás, L., García, R., ... Castillo, I. (2020). *Incendios forestales en Chile: Causas, impactos y resiliencia*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2); Universidad de Chile; Universidad de Concepción; Universidad Austral de Chile.

González, M. E., Syphard, A. D., Fischer, A. P., Muñoz, A. A., & Miranda, A. (2024). Chile's Valparaíso hills on fire. *Science*, 383(6690), 1424. <https://doi.org/10.1126/science.ado5411>

Huneeus, N., Denier van der Gon, H., Castesana, P., Menares, C., Granier, C., Granier, L., Alonso, M., Andrade, M. F., Dawidowski, L., Gallardo, L., Gomez, D., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Osses, M., Puliafito, S. E., Rojas, N., Sánchez-Ccoylo, O., Tolvett, S., & Ynoue, R. Y. (2020). Evaluation of anthropogenic air pollutant emission inventories for South America at national and city scale. *Atmospheric Environment*, 223, 117606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117606>

Ibarra, C. & Orellana, P., coords., varios colaboradores. (2025). Observaciones al Anteproyecto de actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por su sigla en inglés) de Chile en

2025. Centro del Clima y la Resiliencia (CR2). <https://www.cr2.cl/observaciones-del-cr2-a-la-contribucion-nacionalmente-determinada-ndc>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Summary for Policymakers. En V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (H.-O. Pörtner et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
- Jacques, M., Garreaud, R., & Rondanelli, R. (2023). *Meteorología extrema: Uno de los factores tras los incendios de febrero 2023 en el centro-sur de Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-meteorologia-extrema-uno-de-los-factores-tras-los-incendios-de-febrero-2023-en-el-centro-sur-de-chile/>
- Jorquera, H., Cifuentes, L. A., Osses, M., Domínguez, M. P., Valdés, J. M., Cabrera, C., & Busch, P. (2017). *Apoyo a la iniciativa para el Plan de Mitigación de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta en Chile: Resumen ejecutivo*. Estudio solicitado por la Subsecretaría del Medio Ambiente. DICTUC / GreenLabUC. <https://www.greenlab.uc.cl/wp-content/uploads/2017/07/0-Resumen-Ejecutivo.pdf>
- Lara, A., Urrutia-Jalabert, R., Miranda, A., González, M. E., & Zamorano-Elgueta, C. (2023). Bosques nativos. En G. Orrego (Ed.), *Informe País: Estado del Medio Ambiente y del Patrimonio Natural* (2022) (pp. 316–400). Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile.
- Muñoz, F. (2025). *Gobernanza de datos climáticos: Conectando datos para la acción climática* (Policy Brief CR2 N.º 24). Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). <https://www.cr2.cl/policy-brief-cr2-gobernanza-de-datos-climaticos-conectando-datos-para-la-accion-climatica/>
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2024). *Documento del inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Serie 1990–2022*. División de Cambio Climático. https://snichile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2025/03/2024_DIN_CL.pdf
- Osses, M., Rojas, N., Ibarra, C., Valdebenito, V., Laengle, I., Pantoja, N., Osses, D., Basoa, K., Tolvett, S., Huneeus, N., Gallardo, L., & Gómez, B. (2022). High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990–2020. *Earth System Science Data*, 14(3), 1359–1376. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1359-2022>
- Simon, F., Gironás, J., Rivera, J., Vega, A., Arce, G., Molinos-Senante, M., Jorquera, H., Flamant, G., Bustamante, W., Greene, M., Vargas, I., Suárez, F., Pastén, P., & Cortés, S. (2023). Toward sustainability and resilience in Chilean cities: Lessons and recommendations for air, water, and soil issues. *Heliyon*, 9(7), e18191. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18191>
- Urrutia-Jalabert, R., González, M. E., González-Reyes, A., Lara, A., & Garreaud, R. (2018). Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(2), e02171. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2171>
- Vaidula, M., & Hood, C. (2018). *Accounting for baseline targets in NDCs: Issues and options for guidance* (OECD/IEA Climate Change Expert Group Papers No. 2018/02). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9ae65cc1-en>

Referencias de la Sección 5:

- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Blanco, G., Billi, M., Nicolas-Artero, C., Maillet, A., Aldunce, P., Urrutia-Jalabert, R., Zambrano-Bigiarini, M., Guevara, G., Galleguillos, M., Muñoz, A., Christie, D., Marinao, R., & Garreaud, R. (2023). *Seguridad hídrica en Chile: Caracterización y perspectivas de futuro*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) (ANID/FONDAP/1522A0001). <https://www.cr2.cl/seguridadhidrica>
- Asmussen, M. V., Rubilar, R., Bozo, D., Alzamora, R. M., Elissetche, J. P., Pincheira, M., & Jara, O. (2025). Relationship between carbon stock and stand cumulative production at harvesting age of *Pinus radiata* plantations: A comparison between granitic and metamorphic soils. *Sustainability*, 17(8), 3614. <https://doi.org/10.3390/su17083614>
- Bastin, J., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76–79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- Boettinger, J. L., Howell, D. W., Moore, A. M., Hartemink, A. E., & Kienast-Brown, S. (2010). *Digital soil mapping: Bridging research, environmental application, and operation* (Progress in Soil Science, n.º 2). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8863-5>
- Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Marinao, R., & Galleguillos, M. (2024). Increasing water stress in Chile evidenced by novel datasets of water availability, land use and water use. *EGUphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2695>

- Botkin, D. B., Janak, J. F. & Wallis, J.R. (1972). Some Ecological Consequences of a Computer Model of Forest Growth. *The Journal of Ecology* 60(3), 849-872. <https://doi.org/10.2307/2258570>
- Bugmann, H. (1996). A Simplified Forest Model to Study Species Composition Along Climate Gradients. *Ecology*, 77(7), 2055-2074. <https://doi.org/10.2307/2265700>
- Bugmann, H. (2014). Forests in a greenhouse atmosphere: predicting the unpredictable? In D. A. Coomes, D. F. R. P. Burslem, & W. D. Simonson (Eds.), *Forests and Global Change* (pp. 359-380). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107323506.017>
- Bugmann, H., & Seidl, R. (2022). The evolution, complexity and diversity of models of long-term forest dynamics. *Journal of Ecology*, 110(10), 2288-2307. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13989>
- Cherif, E., Feilhauer, H., Berger, K., Dao, P. D., Ewald, M., Hank, T. B., He, Y., Kovach, K. R., Lu, B., Townsend, P. A., & Kattenborn, T. (2023). From spectra to plant functional traits: Transferable multi-trait models from heterogeneous and sparse data. *Remote Sensing of Environment*, 292, 113580. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113580>
- CR2 (Centro del Clima y Resiliencia). (2019). *Plataforma de Simulaciones Climáticas*. <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>
- Corona, M., Gutiérrez, Á., Galleguillos, M., & Osses, J. (6 de noviembre de 2025). Evaluación de productos grillados de biomasa aérea para los bosques de la zona centro-sur de Chile (Póster, ID 196). En Simposio Internacional Clima y Resiliencia: El futuro se hace presente, Viña del Mar, Chile.
- Dinamarca, D.I., Galleguillos, M., Seguel, O., Faúndez, C. (2023). CLSoilMaps: A national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for Chile. *Scientific Data* 10, 630. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02536-x>
- Donoso, C. (2006). Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina : autoecología. Marisa Cuneo, ediciones. 678 p.
- FAO. (2012). Diagnóstico nacional de montaña: Fortalecimiento de la gestión participativa para el desarrollo sostenible de los Andes. Informe Chile. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Gomes, E., Banos, A., Abrantes, P., Rocha, J., & Schläpfer, M. (2020). Future land use changes in a peri-urban context: Local stakeholder views. *The Science Of The Total Environment*, 718, 137381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137381>
- Gutiérrez, A. G. (7 de noviembre de 2025). Capacidad adaptativa de los bosques nativos de Chile al cambio climático (Presentación, ID 276). En Simposio Internacional Clima y Resiliencia: El futuro se hace presente, Viña del Mar, Chile.
- Han, X., Zhang, Y., Chen, H., & Li, J. (2025). A soil organic carbon mapping method based on transfer learning without the use of exogenous data. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1580085. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1580085>
- Henniger, H., Huth, A. & Bohn, F. J. (2023). A new approach to derive productivity of tropical forests using radar remote sensing measurements. *R. Soc. Open Sci.* 10(11), 231186. <https://doi.org/10.1098/rsos.231186>
- Herrera, J., Pfeiffer, M., & Galleguillos, M. (2024). Land subdivision in the law's shadow: Unraveling the drivers and spatial patterns of land subdivision with geospatial analysis and machine learning techniques in complex landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 249, 105106. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105106>
- Herrera Benavides, J., O'Ryan, R., & Galleguillos Torres, M. (2025). ¿Dónde se ubicarán las forestaciones de las estrategias de carbono neutralidad para Chile? Simulación de escenarios espaciales a través del modelo de cambio de uso de suelo futuro (FLUS). En V Reunión Bienal IALE-Chile: Oportunidades y desafíos de la ecología del paisaje en un contexto de cambio global. Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile.
- Kapruwan, R., Saksham, A. K., Ford, J. D., Petzold, J., McDowell, G., Rufat, S., Schneiderbauer, S., Tiwari, S., & Pandey, R. (2025). Climate change adaptation in global mountain regions requires a multi-sectoral approach. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02444-5>
- Krause, A., Papastefanou, P., Gregor, K., Layritz, L. S., Zang, C. S., Buras, A., Li, X., Xiao, J. & Rammig, A. (2022). Quantifying the impacts of land cover change on gross primary productivity globally. *Scientific Reports* 12, 18398. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23120-0>
- Layritz, L. S., Gregor, K., Krause, A., Kruse, S., Meyer, B. F., Pugh, T. A. M., & Rammig, A. (2024). Disentangling future effects of climate change and forest disturbance on vegetation composition and land-surface properties of the boreal forest. *EGUsphere-2024-1028* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1028>.
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, S., Wang, S., & Pei, F. (2017). A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape And Urban Planning*, 168, 94-116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>

- Lopatin, J., Kattenborn, T., Galleguillos, M., Perez-Quzada, J. F., & Schmidlein, S. (2019). Using aboveground vegetation attributes as proxies for mapping peatland belowground carbon stocks. *Remote Sensing of Environment*, 231(May), 111217. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111217>
- Malik, I. H. & Ford, J. D. (2025). Monitoring climate change vulnerability in the Himalayas. *Ambio* 54, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s13280-024-02066-9>
- Matus, F., Salazar, O., Aburto, F., et al. (2024). Perspective of soil carbon sequestration in Chilean volcanic soils. *npj Materials Sustainability*, 2, 32. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00038-4>.
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- Milner-Gulland, E. J., & Shea, K. (2017). Embracing uncertainty in applied ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(6), 2063–2068. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12887>.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2023). *Informe del inventario Nacional de Chile 2022: inventario Nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2020*. División de Cambio Climático. Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2024). *Documento del inventario nacional de gases de efecto invernadero de la Serie 1990-2022*. División de Cambio Climático. Santiago, Chile.
- Miranda, A., Lara, A., Altamirano, A., Zamorano-Elgueta, C., Hernandez, H.J., González, M.E., Pauchard, A., Promis, A. (2018). Monitoring Chilean native forest area: a pending challenge. *Bosque*, 39(2), 265–276. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200265>.
- Nelson, J. A., Walther, S., Gans, F., Kraft, B., Weber, U., Novick, K., ... Jung, M. (2024). X-BASE: the first terrestrial carbon and water flux products from an extended data-driven scaling framework, FLUXCOM-X. *Biogeosciences*, 21, 5079–5115. <https://doi.org/10.5194/bg-21-5079-2024>
- Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2019). Using deep learning for digital soil mapping. *SOIL*, 5(1), 79–89. <https://doi.org/10.5194/soil-5-79-2019>
- Pascual, A., Grau-Neira, A., Morales-Santana, E., Cereceda-Espinoza, F., Pérez-Quzada, J., Cárdenas Martínez, A., & Fuentes-Castillo, T. (2024). Old-growth mapping in Patagonia's evergreen forests must integrate GEDI data to overcome NFI data limitations and to effectively support biodiversity conservation. *Forest Ecology and Management*, 568, 122059. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122059>
- Pavlovic, M., Ilic, S., Ralevic, N., Antonic, N., Raffa, D. W., Bandecchi, M., & Culibrk, D. (2024). A Deep Learning Approach to Estimate Soil Organic Carbon from Remote Sensing. *Remote Sensing*, 16(4), 655. <https://doi.org/10.3390/rs16040655>
- Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 7(1), 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Rasche, L., Fahse, L., Zingg, A., & Bugmann, H. (2012). Enhancing gap model accuracy by modeling dynamic height growth and dynamic maximum tree height. *Ecological Modelling*, 232, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.03.004>.
- Running, S. W. et al. (2004). A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 54(6), 547–560. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:ACSMOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2)
- Sagardía, R., Bahamóndez V., C., Ávila Campos, A., & INFOR. (2024). *Los recursos forestales en Chile 2023: inventario forestal nacional de bosques nativos y actualización de plantaciones forestales*. Instituto Forestal (INFOR).
- Sitch, S., O'Sullivan, M., Robertson, E., Friedlingstein, P., Albergel, C., ... Zaehle, S. (2024). Trends and drivers of terrestrial sources and sinks of carbon dioxide: An overview of the TRENDY project. *Global Biogeochemical Cycles*, 38(7), e2024GB008102. <https://doi.org/10.1029/2024GB008102>
- Snell, R.S., Huth, A., Nabel, J.E.M.S., Bocedi, G., Travis, J.M.J., Gravel, D., Bugmann, H., Gutiérrez, A.G., Hickler, T., Higgins, S.I., Reineking, B., Scherstjanoi, M., Zurbriggen, N. and Lischke, H. (2014). Using dynamic vegetation models to simulate plant range shifts. *Ecography*, 37: 1184–1197. <https://doi.org/10.1111/ecog.00580>.
- Spawn, S. A., Sullivan, C. C., Lark, T. J., & Gibbs, H. K. (2020). Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010. *Scientific Data*, 7, 112. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4>
- Tarsetti, I. (2025). *Impacto de la Topografía en la Estimación de Rasgos de Vegetación con datos satelitales en la Región Precordillerana de Chile*. [Master in Science of Data Sciece. Universidad Adolfo Ibáñez].
- Wadoux, A. M. J.-C., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2020). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions. *Earth-Science Reviews*, 210, 103359. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>.

Referencias de la Sección 6:

- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, 613–614, 944–957. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717324932>.
- Amorim-Maia, A. T., Anguelovski, I., Connolly, J., & Chu, E. (2023). Seeking refuge? The potential of urban climate shelters to address intersecting vulnerabilities. *Landscape and Urban Planning*, 238, 104836. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104836>.
- Ashcroft, M. B. (2010). Identifying refugia from climate change. *Journal of Biogeography*, 37, 1407–1413. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02300.x>.
- Bannister, J., Ovalle, J., & Vargas-Gaete, R. (Eds.). (2024). *Restauración de ecosistemas forestales*. Editorial Universitaria. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/32742>
- Berisha, V., Hondula, D., Roach, M., White, J. R., McKinney, B., Bentz, D., ... Goodin, K. (2017). Assessing adaptation strategies for extreme heat: A public health evaluation of cooling centers in Maricopa County, Arizona. *Weather, Climate, and Society*, 9(1), 71–80. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0033.1>.
- Birks, H. J. B. (2015). Some reflections on the refugium concept and its terminology in historical biogeography, contemporary ecology and global-change biology. *Biodiversity*, 16, 196–212. <https://doi.org/10.1080/14888386.2015.1117022>.
- Braun, A., Faßnacht, F., Valencia, D., & Sepúlveda, M. (2021). Consequences of land-use change and the wildfire disaster of 2017 for the central Chilean biodiversity hotspot. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01756-4>.
- Brunel-Saldías, N., Martínez, I., Seguel, O., Ovalle, C., & Acevedo, E. (2016). Structural characterization of a compacted Alfisol under different tillage systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(3), 689–701. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000050>.
- Carroll, C. F., Gill, J. L., & McDonough MacKenzie, C. (2023). Early Holocene plant macrofossils indicate cool refugia for subalpine plant taxa in Acadia National Park, Maine. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1008594. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1008594>.
- Chinchilla, J., Carbonnel, A., & Galleguillos, M. (2021). Effect of urban tree diversity and condition on surface temperature at the city block scale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127069. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127069>.
- Cid Aguayo, B. E., Carrasco Henríquez, N., & Alonso Ferrer, A. M. (Eds.). (2024). *Comunes costeros. Una guía para su reconocimiento y cuidado ante el cambio climático*. Amukan Editorial. doi:10.29393/L4UDEC-10CCHN30010. <https://cienciaslocales.cl/documentos/Comunes-costeros-2024.pdf>
- CONAF. (2025). *Base de datos de bonificaciones, montos y hectáreas asociadas a los incentivos de la Ley 20.283 (2010–2024)*. Información obtenida mediante solicitud por Ley de Transparencia.
- Dörner, J., Dec, D., Zúñiga, F., Sandoval, P., & Horn, R. (2011). Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. *Soil & Tillage Research*, 71–79. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198711001310>
- Ellies, A. (1995). Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque*, 16(2), 101–110. <http://revistas.uach.cl/pdf/bosque/v16n2/art09.pdf>
- Gelcich, S., Hughes, T. P., Olsson, P., Folke, C., Defeo, O., Fernández, M., Foale, S., Gunderson, L., Rodriguez-Sickert, C., Scheffer, M., Steneck, R. S., & Castilla, J. C. (2010). Navigating transformations in governance of Chilean marine coastal resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(39), 16794–16799. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012021107>.
- Gómez-González, S., González, M. E., Paula, S., Díaz-Hormazábal, I., Lara, A., & Delgado-Baquerizo, M. (2019). Temperature and agriculture are largely associated with fire activity in Central Chile across different temporal periods. *Forest Ecology and Management*, 433, 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.041>.
- Gómez-González, S., Paniw, M., Blanco-Pastor, J. L., García-Cervigón, A.I., Godoy, O., Herrera, J.M., Lara, A., Miranda, A., Ojeda, F., Ochoa-Hueso, R. (2022). Moving towards the ecological intensification of tree plantations. *Trends in Plant Science*, 27(7), 637–645. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.12.009>
- González, M. E., Galleguillos, M., Lopatin, J., Leal, C., Becerra-Rodas, C., Lara, A., & San Martín, J. (2022a). Surviving in a hostile landscape: *Nothofagus alessandrii* remnant forests threatened by megafires and exotic pine invasion in the coastal range of central Chile. *Oryx* 57(2), 228–238. <https://doi.org/10.1017/S0030605322000102>
- Gonzalez, M. E., Becerra-Rodas, C., Lara, A., Little, C., & Martin, J. S. (2022b). La influencia del fuego en la dinámica de los bosques de *Nothofagus alessandrii*. En J. San Martín (Ed), *Los bosques relictos de Rui: Ecología, biodiversidad, conservación y restauración* (pp. 417–430). El Sur Impresores Ltda. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/32506/32506.pdf?sequence=3&isAllowed=>

- Graham, O. J., et al. (2023). Deeper habitats and cooler temperatures moderate a climate-driven seagrass disease. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378, 20220016.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0016>
- Herrera, J., Pfeiffer, M., & Galleguillos, M. (2024). Land subdivision in the law's shadow: Unraveling the drivers and spatial patterns of land subdivision with geospatial analysis and machine learning techniques in complex landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 249, 105106.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105106>
- Lara, A., Urrutia-Jalabert, R., Miranda, A., González, M. E., & Zamorano-Elgueta, C. (2023). Bosques nativos (Capítulo 3.). En G. Orrego (Ed.), *Informe País: Estado del Medio Ambiente y del Patrimonio Natural* (2022) (pp. 316–400). Centro de Análisis de Políticas Públicas, Facultad de Gobierno, Universidad de Chile.
- Lara, A., Bustos-Salazar, A., González, M. E., Little, C., Becerra-Rodas, C., Jones, J., Vergara, N., & Molina, I. (2024). Restauración de bosques nativos para la recuperación de la biodiversidad y servicios ecosistémicos. En J. R. Bannister, J. F. Ovalle, R. Vargas-Gaete, & V. Claramunt-Torche (Eds.), *Restauración de ecosistemas forestales en Chile* (pp. 316–400). Editorial Universitaria.
- Leal-Medina, C., Lopatin, J., Contreras, A., González, M. E., & Galleguillos, M. (2024). Post-fire *Pinus radiata* invasion in a threatened biodiversity hotspot forest: A multi-scale remote sensing assessment. *Forest Ecology and Management*, 561, 121861.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121861>
- Little, C., & Lara, A. (2010). Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile. *Bosque*, 31(3), 175–178.
<https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000300001>
- Loarie, S. R., Duffy, P. B., Hamilton, H., Asner, G. P., Field, C. B., & Ackerly, D. D. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462, 1052–1055.
<https://doi.org/10.1038/nature08649>
- López, F., Crespo, E., Llorca, R., & Santacana, E. (2023). Schools as climate shelters: Design, implementation and monitoring methodology based on the Barcelona experience. *Journal of Cleaner Production*, 432.
[https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139588.](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139588)
- Morelli, T. L., Barrows, C. W., Ramirez, A. R., Cartwright, J. M., Ackerly, D. D., Eaves, T. D., Ebersole, J. L., Krawchuk, M. A., Letcher, B. H., Mahalovich, M. F., Meigs, G. W., Michalak, J. L., Millar, C. I., Quiñones, R. M., Stralberg, D., & Thorne, J. H. (2020). Climate-change refugia: Biodiversity in the slow lane. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18, 228–234.]
<https://doi.org/10.1002/fee.2189>
- Morelli, T. L., Daly, C., Dobrowski, S. Z., Dulen, D. M., Ebersole, J. L., Jackson, S. T., Lundquist, J. D., Millar, C. I., Maher, S. P., Monahan, W. B., Nydick, K. R., Redmond, K. T., Sawyer, S. C., Stock, S., & Beissinger, S. R. (2016). Managing climate change refugia for climate adaptation. *PLoS ONE*, 11(1), e0159909.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159909>
- Ovalle, R., Seguel, O., & Pfeiffer, M. (2023). Influencia de las prácticas agrícolas en la dinámica de los carbonatos en los suelos. *Agro Sur*, 51(1), 19–32.
<https://doi.org/10.4206/agrosur.2023.v51n1-02>
- Palma, R., Ulloa, A., Espín, D., Merino, D., Pando Flores, D., Herrera, F., Tapia, H., Alée, J., Beyer, J., Osorio, J. C., Vargas, J. P., González, G., Morán, L., Montedonico, M., Arenas, M. J., Recabarren, M., Smith, P., Guiñez, P., Álvarez, R., & Gálvez, Y. (2024). *Promoción de infraestructura energética habilitante para el fomento de actividad industrial en regiones del país hacia un desarrollo productivo sostenible: Informe final*. Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile; Universidad de Concepción. Ministerio de Energía, Programa Desarrollo Productivo Sostenible.
- Sánchez de Pedro, R., Fernández, A. N., Melero-Jiménez, I. J., García-Sánchez, M. J., Flores-Moya, A., & Bañares-España, E. (2023). Temporal and spatial variability in population traits of an intertidal fucoid reveals local-scale climatic refugia. *Marine Environmental Research*, 188, 106006.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106006>
- Seguel, O., Fariñas, E., Luzio, W., Casanova, M., Pino, I., Parada, A. M., Videla, X., & Nario, A. (2015). Physical properties of soil after change of use from native forest to vineyard. *Agro Sur*, 43(2), 23–39.
<http://dx.doi.org/doi:10.4206/agrosur.2015.v43n2-05>
- Seguel, O., Baginsky, C., Contreras, A., Covarrubias, J. I., González, C., Valenzuela, F., & Callejas, R. (2021). Cambios estructurales de suelo con aplicaciones de enmiendas orgánicas en un Haplargid franco cultivado con vid. *Agro Sur*, 49(3), 1–12.
<https://doi.org/10.4206/agrosur.2021.v49n3-01>
- Seguel, O., Hardy, C., & Alfaro, F. (Eds.). (2020). *Estrategias de gestión del riego para aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas: Experiencias frente al proceso de aridización*. Universidad de Chile - FIA.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79(1), 7–31.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>

Soto, L., Galleguillos, M., Seguel, O., Sotomayor, B., & Lara, A. (2019). Assessment of soil physical properties status under different land covers within a landscape dominated by exotic industrial tree plantations in south-central Chile. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(1), 12–23.
<https://doi.org/10.2489/jswc.74.1.12>

Widerynski, S., Schramm, P., Conlon, K., Noe, R., Grossman, E., Hawkins, M., ... Hilts, A. S. (2017). *The use of cooling centers to prevent heat-related illness: Summary of evidence and strategies for implementation* (Climate and Health Technical Report Series). Centers for Disease Control and Prevention.
https://heathealth.info/wp-content/uploads/cdc_47657_DS1-compressed-1.pdf

Wilkes, M. A., Carrivick, J. L., Castella, E., et al. (2023). Glacier retreat reorganizes river habitats leaving refugia for Alpine invertebrate biodiversity poorly protected. *Nature Ecology & Evolution*, 7, 841–851.
<https://doi.org/10.1038/s41559-023-02061-5>

INFORME A LAS NACIONES

Carbono neutralidad en Chile: desafíos y oportunidades para un país más justo y resiliente al clima

(CR)² | Center for Climate
and Resilience Research

-  www.cr2.cl
-  [@cr2_uchile](https://twitter.com/cr2_uchile)
-  [@cr2uchile](https://www.facebook.com/cr2uchile)
-  [@cr2.uchile](https://www.instagram.com/cr2.uchile)
-  [cr2-ciencia](https://www.linkedin.com/company/cr2-ciencia)
-  [@CentroCR2](https://www.youtube.com/@CentroCR2)
-  [@ centro.cr2@uchile.cl](mailto:centro.cr2@uchile.cl)
-  [\(+562\) 2978 4446](tel:+56229784446)

 Blanco Encalada 2002, 4to piso. FCFM - Universidad de Chile

