

PRIMER INFORME REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y PROPUESTA METODOLÓGICA



Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático Sector Silvoagropecuario, Chile

Abril 2022

Este informe de avance corresponde al primer entregable de la consultoría de *Estrategia de Financiamiento para el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Silvoagropecuario Chile*. Este informe, presentado por Tepual Conservación para la FAO y el Ministerio de Agricultura de Chile, entrega una revisión del estado del arte y una metodología para llevar a cabo esta Estrategia de Financiamiento, a través del costeo de la inacción y de las medidas priorizadas para el PANCC-SAP.



PRIMER INFORME REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y PROPUESTA METODOLÓGICA
PLAN NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO SECTOR
SILVOAGROPECUARIO, CHILE

Equipo redactor:

Trinidad Cerda Schmidt, Ingeniera Agrónoma, Tepual Conservación
Dafna Bitran Dirven, Economista, Tepual Conservación
Ignacio Concha O’Ryan, Ingeniero, Tepual Conservación
Andrés Otero Correa, Economista, Tepual Conservación

Equipo revisor:

Jacqueline Espinoza Oyarzún, ODEPA
Blanca Torres Urbina, FAO
Constanza Saa Isamit, FAO
Felipe Traub, FAO
Subcomité Técnico Intraministerial de Cambio Climático, MINAGRI
Comité Técnico Intraministerial de Cambio Climático, MINAGRI

Documento elaborado en el marco del proceso de actualización del Plan de Adaptación al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario, financiado por el Fondo Verde para el Clima y ejecutado por el Ministerio de Agricultura.

Diseño y diagramación:

Tepual Conservación

Registro ISSN: XXXXXXXXXXXX

Marzo, 2022

Citar como: XXXXXXXXXXXX



ÍNDICE GENERAL

●	Glosario	4
●	Siglas Y Acrónimos	8
1	Resumen	9
2	Introducción	10
3	ANTECEDENTES GENERALES	12
3.1	Impactos en sistemas silvoagropecuarios (SAP)	14
3.2	Situación actual de las proyecciones climáticas	15
3.3	Modelos y su aplicación al sector agrícola	20
3.3.1	Modelación de impactos en el sector silvoagropecuario	21
3.3.1.1	Metodología de zonas agroecológicas (AEZ)	22
I.	GLOBIOM.....	26
II.	MAGPIE	28
3.4	Modelación De Los Impactos Del Cambio Climático	29
3.4.1	PAGE, FUND, DICE.....	30
3.4.2	Esfuerzos actuales de estimación del impacto económico del cambio climático	33
3.5	Análisis y consideraciones para la determinación metodológica del trabajo	36
4	METODOLOGÍA	38
4.1	Objetivo del estudio	39
4.1.1	Objetivo principal del trabajo	39
4.2	Resumen de la metodología de trabajo	40
4.2.1	Esquema de cálculo de beneficio de medidas de adaptación	42
4.2.2	Fuentes de información necesarias.....	43
4.3	Costeo de medidas	43
4.4	Costeo de la inacción – definiciones preliminares	46
4.4.1	Definición de inacción	46
4.4.2	Impactos en el sector SAP	49
4.4.3	Sub-sectores primarios considerados.....	49
4.4.4	Escenario de cambio climático	51



4.5	Costeo de la inacción – metodología de cálculo	51
4.5.1	Descripción del rendimiento ambiental de los subsectores	51
4.5.2	Caracterización de las áreas de estudio y estimación de producción en escenario con CC	53
4.5.3	Cuantificación del beneficio y el costo de la inacción	55
4.5.3.1	Caracterización del impacto de cada medida	55
4.5.3.2	Metodología de cálculo del beneficio de cada medida	55
4.6	Plan de implementación	56
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
6	Bibliografía	58

BORRADOR



- GLOSARIO

Termino	Definición
Adaptación	En los sistemas humanos, el proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos, a fin de moderar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En los sistemas naturales, el proceso de ajuste al clima real y sus efectos; la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y sus efectos.
Adaptación al cambio climático	Toda acción, medida o proceso de ajuste al clima actual o proyectado, o a sus efectos en sistemas humanos o naturales, con el fin de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas.
Agricultura	Es el conjunto de actividades económicas y técnicas relacionadas con el tratamiento del suelo y el cultivo de la tierra para la producción de especies. Comprende todo un conjunto de acciones humanas que transforma el medio ambiente natural. A menos que se mencione explícitamente en el contexto de este documento, al referirse a agricultura se habla del total de actividades del sector silvoagropecuario.
Alineamiento verde	Alineamiento de políticas para gestionar los riesgos y movilizar capital para inversiones verdes, bajas en carbono y resilientes, en el contexto más amplio del desarrollo ambientalmente sostenible.
Antropoceno	El Antropoceno es un nombre propuesto para designar una nueva época geológica que se deriva de los importantes cambios que las actividades humanas provocan en la estructura y el funcionamiento del sistema Tierra, incluido el sistema climático. La nueva época propuesta, que la comunidad de las ciencias del sistema Tierra introdujo originalmente en el año 2000, es actualmente objeto de un proceso de formalización en el seno de la comunidad geológica sobre la base de evidencias estratigráficas que indican que las actividades humanas han modificado el sistema Tierra hasta el punto de formar depósitos geológicos con características que son diferentes del holoceno y que formarán parte del registro geológico. Para definir el Antropoceno, tanto en el enfoque estratigráfico como en el enfoque del sistema Tierra se considera que la fecha de inicio más adecuada es la mitad del siglo XX, aunque se han propuesto otras fechas que seguirán analizándose. Diversas disciplinas y el público en general han adoptado el concepto del Antropoceno para referirse a la considerable influencia que los seres humanos han ejercido en el estado, la dinámica y el futuro del sistema Tierra.
Cadenas de valor	Modelo teórico que permite describir el desarrollo de las actividades de una organización empresarial generando valor al producto final.
Calentamiento global	Aumento estimado de la temperatura media global en superficie promediada durante un período de 30 años, o durante el período de 30 años centrado en un año o decenio particular, expresado en relación con los niveles preindustriales, a menos que se especifique de otra manera. Para los períodos de 30 años que abarcan años pasados y futuros, se supone que continúa la actual tendencia de calentamiento multidecenal.
Cambio climático	El cambio climático hace referencia a una variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante períodos prolongados, generalmente décadas o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. La Convención Marco de las



	<p>Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.</p>
Cambio climático	<p>Se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.</p>
Capacidad de adaptación	<p>Capacidad de los sistemas, las instituciones, los seres humanos y otros organismos para adaptarse ante posibles daños, aprovechar las oportunidades o afrontar las consecuencias.</p>
Carbono neutralidad	<p>Conseguir emisiones netas cero de dióxido de carbono, ya sea mediante el equilibrio de las emisiones de carbono con la eliminación de carbono (a través de esquemas de compensación de carbono, o captura biológica o geológica) o simplemente eliminando las emisiones por completo.</p>
Crecimiento verde	<p>Fomenta el crecimiento económico y el desarrollo, garantizando que los ecosistemas continúen proporcionando en el tiempo los servicios de los que el bienestar social depende. Con este objetivo se cataliza la inversión y la innovación, como la base de un crecimiento sostenido al generar nuevas oportunidades económicas.</p>
Desarrollo compatible con el clima	<p>Forma de desarrollo que se basa en estrategias climáticas que incorporan los objetivos y estrategias de desarrollo que integran la gestión de riesgos climáticos, la adaptación al clima y la mitigación climática.</p>
Descarbonización	<p>a) Nivel de emisiones globales compatibles con el objetivo del Acuerdo de París. b) Trayectorias de emisiones compatibles con el nivel de reducción necesarias para cumplir el Acuerdo de París. c) Proceso de eliminación de emisiones de gases de efecto invernadero en la economía de un país. Generalmente, esto implica la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en la generación de electricidad; el cambio de combustibles en el transporte, la calefacción y las industrias; una mayor eficiencia en todos los sectores; y la conservación y aumento de los sumideros de carbono.</p>
Economía circular	<p>Ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva y aumenta el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema, gestionando stocks finitos y flujos renovables.</p>
Efectos adversos del cambio climático	<p>Las alteraciones al medio ambiente, provocadas directa o indirectamente por el cambio climático, que tienen consecuencias nocivas significativas en la composición, la capacidad de recuperación o la productividad de los ecosistemas, en la salud y el bienestar humano, o en los sistemas socioeconómicos.</p>
Escenario	<p>Descripción plausible de un futuro verosímil, basada en un conjunto coherente e internamente congruente de supuestos sobre las fuerzas motrices (p. ej., el ritmo del cambio tecnológico y los precios) y sobre las relaciones más importantes. Obsérvese que los escenarios no son ni predicciones ni pronósticos, pero son útiles porque ofrecen un panorama de las consecuencias de la evolución de distintas situaciones y medidas.</p>
Escenario de referencia	<p>Se puede utilizar como “escenario sin introducción de cambios”. En el contexto de las trayectorias de transformación, la expresión “escenarios de referencia” denota escenarios que están basados en la hipótesis de que no se aplicará ninguna política</p>



	o medida de mitigación más allá de las que están ya en vigor o se han legislado o está previsto que se aprueben.
Financiamiento climático	El financiamiento que busca reducir las emisiones y mejorar los sumideros de los gases de efecto invernadero, así como reducir la vulnerabilidad, el mantenimiento y el aumento de la resistencia de los sistemas humanos y ecológicos a los impactos negativos del cambio climático.
Financiamiento de la adaptación	Financiación de actividades que abordan los efectos actuales y esperados del cambio climático, donde dichos efectos son importantes para el contexto de esas actividades.
Finanzas mezcladas (blended finance)	Utilización estratégica de financiamiento destinado a la movilización de recursos adicionales de distintas fuentes, para el desarrollo sustentable en países en desarrollo.
Finanzas Verdes	Financiamiento para lograr un crecimiento económico al tiempo que se reduce la contaminación y las emisiones de gases de efecto invernadero, minimiza los desperdicios y mejora la eficiencia en el uso de los recursos naturales.
Impactos (consecuencias, resultados)	Consecuencias de los riesgos materializados en los sistemas humanos y naturales, donde los riesgos provienen de las interacciones entre los peligros relacionados con el clima (incluidos los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos), la exposición y la vulnerabilidad. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud y bienestar, ecosistemas y especies, bienes económicos, sociales y culturales, servicios (incluidos los servicios ecosistémicos) e infraestructuras. También pueden denominarse consecuencias o resultados, y pueden ser adversos o beneficiosos.
Malas medidas adaptativas (mala adaptación)	Medidas que pueden conducir a un mayor riesgo de resultados adversos en relación con el clima, por ejemplo, a través de un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, a una mayor vulnerabilidad al cambio climático o a un menor bienestar, en el presente o en el futuro. La mala adaptación generalmente es una consecuencia imprevista.
Mega sequía	Las mega sequías son sequías prolongadas y extensas, que duran mucho más de lo normal, generalmente 10 años o más.
Mitigación	Toda acción, medida o proceso orientado a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, o restringir el uso de dichos gases como refrigerantes, aislantes, en procesos industriales, entre otros. O la acción destinada a incrementar los sumideros de dichos gases, con el fin de limitar los efectos adversos del cambio.
Opciones de adaptación	Conjunto de estrategias y medidas disponibles y adecuadas para hacer frente a las necesidades de adaptación. Incluyen una amplia gama de medidas que se pueden clasificar como estructurales, institucionales, ecológicas o de comportamiento.
Resiliencia	Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligrosos respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.
Seguridad alimentaria	Situación existente cuando todas las personas tienen en todo momento el acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfacen sus necesidades y preferencias alimentarias para llevar una vida activa y sana.
Sequía	Período de condiciones anormalmente secas durante un tiempo suficiente para causar un desequilibrio hidrológico grave. El término sequía es relativo y, por tanto, ningún examen sobre déficit de precipitaciones debe referirse a la particular actividad conexas a las precipitaciones objeto de examen. Por ejemplo, la escasez de precipitaciones durante el período de crecimiento incide en la producción de los cultivos o la función de los ecosistemas en general (debido al déficit de humedad del suelo, también denominado sequía agrícola), y durante la estación de escorrentía y



	<p>percolación afecta principalmente a los aportes hídricos (sequía hidrológica). La humedad y las aguas subterráneas almacenadas por el suelo también resultan afectadas por los aumentos en la evapotranspiración real y por las disminuciones en la precipitación. Todo período con déficit anormal de precipitación se define como sequía meteorológica. Véase también Humedad del suelo.</p>
Servicios ecosistémicos	<p>Procesos o funciones ecológicas que tienen un valor, monetario o no, para los individuos o para la sociedad en su conjunto. Generalmente se clasifican en: 1) servicios de apoyo, por ejemplo, mantenimiento de la productividad o la biodiversidad; 2) servicios de aprovisionamiento, por ejemplo, de alimentos o fibra; 3) servicios de regulación, por ejemplo, regulación del clima o secuestro de carbono; y 4) servicios culturales, como el turismo o el disfrute espiritual o estético.</p>
Silvoagropecuario (SAP)	<p>Sector compuesto por las actividades de productos agrícolas, frutas, ganado, productos pecuarios y carnes, productos silvícolas y madereros.</p>
Sostenibilidad	<p>Proceso dinámico que garantiza la persistencia de los sistemas humanos y naturales de forma equitativa.</p>
Trayectorias de desarrollo resilientes al clima	<p>Trayectorias que fortalecen el desarrollo sostenible y los esfuerzos desplegados para erradicar la pobreza y reducir las desigualdades, a la vez que promueven una adaptación justa y multiescalar al cambio climático y la resiliencia al clima. Plantean los aspectos relativos a la ética, la equidad y la viabilidad de la profunda transformación social necesaria para reducir radicalmente las emisiones a fin de limitar el calentamiento global (p. ej., a 1,5 °C) y lograr el bienestar y un futuro deseable y digno para todos.</p>
Vulnerabilidad	<p>Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.</p>



● SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Sigla	Significado
AR	Assessment Report. Principal entregable elaborado por el IPCC.
CC	Cambio climático.
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
CO2	Dióxido de carbono, molécula y principal forzante climático de la Tierra.
ECLP	Estrategia Climática de Largo Plazo.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (por sus siglas en inglés).
GEI	Gas de efecto invernadero.
IAM	Modelo de evaluación integrado.
IPCC	Panel intergubernamental de cambio climático (por sus siglas en inglés).
NDC	Contribución Determinada a nivel Nacional (por sus siglas en inglés).
MMA	Ministerio de Medio Ambiente.
PNACC-SAP	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático – Sector Silvoagropecuario.
RCP	Trayectoria de concentración representativa (por sus siglas en inglés).
SAP	Sector silvoagropecuario.
SSP	Trayectoria socioeconómica compartida (por sus siglas en inglés).
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (por sus siglas en inglés).

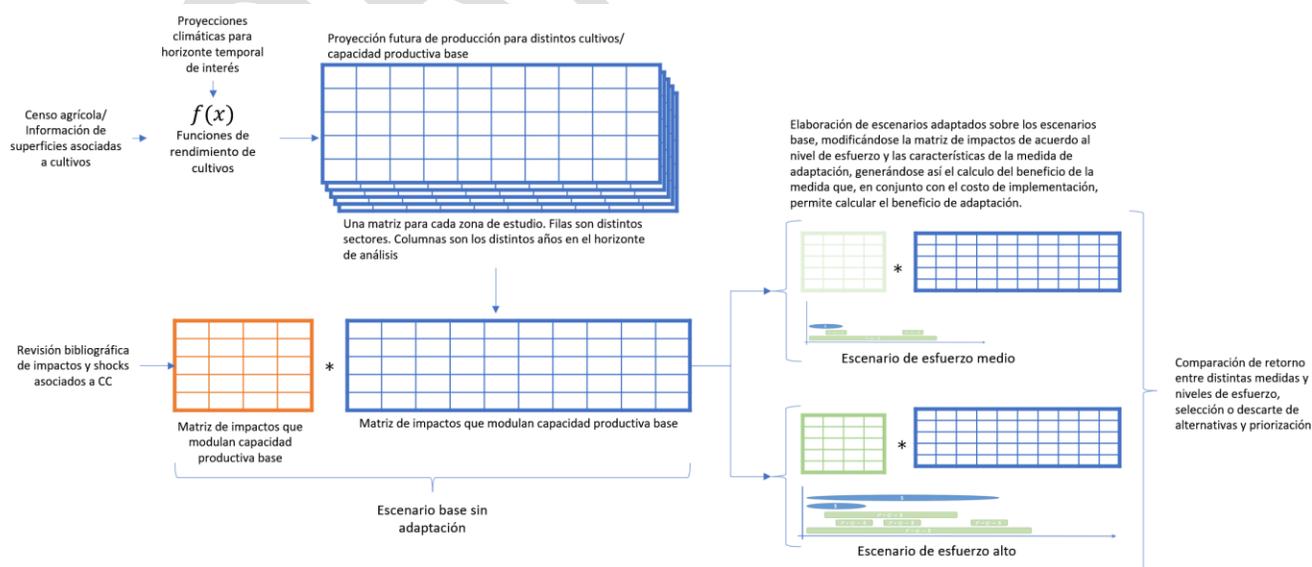
1 RESUMEN

Este primer informe corresponde al entregable inicial de la consultoría de *Estrategia de Financiamiento para el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para el Sector Silvoagropecuario Chile*. Este informe, presentado por Tepual Conservación para el Ministerio de Agricultura de Chile y la FAO, señala y describe una revisión bibliográfica, un marco teórico y una metodología para estimación del costo de la inacción y los beneficios asociados al set de medidas de adaptación que se han priorizado en el marco del proceso de actualización del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para el sector silvoagropecuario.

Durante la revisión se identificó una sólida literatura en relación a la proyección de cambios en el clima planetario para variedad de escenarios futuros, más una situación menos desarrollada en cuanto al análisis de los impactos sobre distintos sistemas de interés e incluso menos información en cuanto al análisis económico de estos impactos.

En atención a este escenario, se analizó una serie de técnicas alternativas para la cuantificación de estos impactos, identificándose alta heterogeneidad en la complejidad y capacidades de las distintas alternativas. Finalmente, se ensambló una metodología para la cuantificación de costos e impactos de medidas de adaptación al cambio climático para el sector Silvoagropecuario replicable y en línea con los objetivos planteados para el presente trabajo.

Figura 1-1. Esquema resumen de metodología de costeo



Fuente: Elaboración propia



2 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos dos siglos, el uso de combustibles fósiles ha incrementado la concentración atmosférica de CO₂ a niveles sin precedentes en los últimos cientos de miles de años. Esto ha elevado la temperatura promedio del planeta y la frecuencia de eventos climáticos extremos. Con alta probabilidad, estas emisiones continuarán en el mediano plazo, alterando significativamente los ciclos climáticos de los cuales dependen los sistemas productivos mundiales y en particular, los silvoagropecuarios.

Estas alteraciones tienen el potencial de generar un impacto profundo en la productividad y el bienestar de nuestras sociedades, las cuales, no obstante, poseen la oportunidad de responder a esta situación, principalmente, mediante medidas de mitigación y adaptación. Sin embargo, la capacidad de respuesta de las sociedades es limitada, disponiendo de recursos escasos que deben ser invertidos de manera estratégica. En este contexto, la toma de decisión respecto a cuáles medidas de mitigación y/o adaptación priorizar comúnmente cae en la categoría de problemas perversos¹ ("wicked problems") debido a la complejidad de las interacciones entre sus causas u orígenes con posibles soluciones, la falta de información o el alto costo de testeo de posibles soluciones, entre otras.

Esto genera la necesidad, para los tomadores de decisión, de contar con herramientas que les permitan comparar y priorizar las distintas alternativas disponibles con el fin de impulsar las sociedades en la mejor trayectoria futura. Para esto, una de las herramientas disponibles son modelos que permitan proyectar los futuros impactos del cambio climático y tanto el costo como la efectividad del portafolio de medidas que las sociedades tendrán a su disposición para hacer frente a las consecuencias de este fenómeno.

¹ Un **"problema retorcido"** (en inglés, **"wicked problem"**) es un concepto utilizado para describir un problema que es difícil o imposible de resolver dado que presenta requisitos incompletos, contradictorios y cambiantes que generalmente son difíciles de reconocer. El término "retorcido" no se utiliza en un sentido malvado, sino más bien como resistencia a la solución.



En Chile, distintas iniciativas se han empujado en este contexto a nivel de gobierno. Relevante para este trabajo es destacar la elaboración en 2013 del primer plan de adaptación al cambio climático para el sector silvoagropecuario. Adicionalmente, también resulta relevante destacar la Contribución determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) cuya última actualización se realizó en 2020 y establece en su contribución 5.2.1 letra c) que a “2021-2028: Se habrán actualizado y comenzado a implementar los Planes de Adaptación para los sectores Silvoagropecuario”. Finalmente, se puede destacar la estrategia climática a largo plazo que establece el compromiso: “Al 2025 se hará la primera identificación de las pérdidas y daños del país en la evaluación de los costos de la inacción, y al 2030 se contará con una metodología consensuada para que sea incorporada en todos los planes sectoriales de adaptación y en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.”

El objetivo del presente documento es entregar una metodología para el desarrollo de un modelo que apoye la toma de decisión respecto a los esfuerzos la actualización del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para el sector silvoagropecuario chileno (PANCC-SAP), permitiendo obtener los costos de acción y de inacción de una serie de medidas priorizadas a nivel nacional. Además, la metodología incluye el diseño de un plan de financiamiento que permita obtener los recursos necesarios para poner en marcha estos esfuerzos. Adicionalmente y con el fin de entregar un marco al modelo propuesto, se entrega un resumen de la situación actual y las características del estado del arte respecto al desarrollo de dichos modelos.



Figura 2-1. Viñedos en el Valle de Elqui.



Fuente: Elaboración propia

3 ANTECEDENTES GENERALES

A pesar de que el ser humano moderno ha existido sobre la tierra por más de 300.000 años, solo durante la última fracción de ese tiempo ha adoptado la práctica de la agricultura (Richerson et al., 2001) (Smil, 2004). La aparición de este fenómeno se alinea con el inicio de un periodo climático conocido como el Holoceno, caracterizado por una inusitada estabilidad en el clima planetario (Johnsen et al., 2001).

La temperatura promedio del planeta se encuentra regulada, principalmente, por la intensidad del flujo de radiación que recibe del Sol, la fracción reflejada de esta radiación (conocida como



albedo) y la intensidad de un fenómeno conocido como efecto invernadero (Georgia State University, n.d., p. 6). El efecto invernadero a su vez depende, principalmente, de la concentración atmosférica de gases opacos al paso de la radiación infrarroja. Aunque el principal gas de efecto invernadero es el vapor de agua, la concentración de este depende de la temperatura promedio de la atmósfera, por lo tanto, este no es capaz de forzar la intensidad del efecto invernadero, sino actuar como un retroalimentador positivo del efecto de otros gases forzantes del efecto invernadero (Schmidt et al., 2010).

El segundo gas de efecto invernadero en términos de relevancia es el dióxido de carbono o CO₂. El CO₂ es una de las formas en las que el carbono viaja y se almacena entre los distintos componentes de la superficie terrestre, incluyendo la atmósfera, la hidrosfera, la geosfera y la biosfera. Aunque el total acumulado de carbono se conserva al ser intercambiado entre estos sistemas, el total de carbono disponible en la superficie puede variar. Esto, principalmente, mediante dos fenómenos: la inyección hacia la superficie de material producto de la actividad volcánica del planeta y la decantación de formas carbonatadas, transportadas por acción del ciclo hidrológico hacia el fondo de los cuerpos oceánicos, donde eventualmente es reabsorbida por las capas inferiores de la geosfera (Riebeek, 2011).

Sin embargo, a pesar de que en apariencia estos procesos de adición y extracción trabajan de manera independiente, pudiendo el efecto de uno sobrepasar al otro, en la práctica el carbono total disponible en la superficie terrestre se ha mantenido estable dentro de ciertos límites. Esto gracias a la acción reguladora que el ciclo hidrológico ejerce sobre el flujo de carbono que es transportado hacia los océanos (Maher & Chamberlain, 2014).

Debido a que la intensidad del ciclo hidrológico aumenta con la temperatura promedio del planeta, el aumento de esta acelera el proceso de remoción de carbono de la superficie. Este fenómeno modula la intensidad del efecto invernadero y crea un efecto regulador y de equilibrio sobre la temperatura promedio planetaria, a su vez configurando un cierto ritmo geológico basal a la variación del total de carbono en la superficie de la tierra. De esta manera la tierra estructura un sistema de autorregulación climática mientras no sea empujado fuera



de sus límites, lo que ha mantenido la temperatura promedio de su superficie dentro de ciertos límites estables durante su historia reciente (Steffen et al., 2018).

En efecto, si bien los registros paleoclimáticos extraídos de núcleos de hielos permanentes en los extremos polares del planeta permiten observar un proceso de oscilaciones climáticas, impulsado por los ciclos de Milankovitch, estos se han mantenido dentro de un rango constante por los últimos 800.000 años (Uemura et al., 2018).

Dado este contexto, el aumento de CO₂ en la atmósfera producido durante la época industrial es un evento sin precedentes en la historia geológica reciente del planeta. En efecto, no sólo la adición de carbono ha impulsado la concentración de carbono atmosférico fuera de los límites autorregulados por la acción geológica, sino además este cambio se ha producido, aproximadamente, cien veces más rápido que las mayores variaciones naturales registradas en los núcleos de hielo antárticos (Gaffney & Steffen, 2017).

3.1 Impactos en sistemas silvoagropecuarios (SAP)

Aunque el cambio climático representa riesgos para una multitud de dimensiones de los sistemas sociales y naturales del planeta, uno de los sectores donde existe mayor certeza de sus impactos es el silvoagropecuario (SAP). En efecto, se considera que el cambio climático, incluido el aumento en la intensidad y frecuencia de los eventos extremos, ya ha impactado negativamente la seguridad hídrica y alimentaria del mundo, y se espera con alta confianza que continúe esta tendencia, afectando además los esfuerzos por cumplir las metas de desarrollo sostenible. Estos impactos se agrupan en zonas de media y baja latitud, incluyendo grandes regiones de Sudamérica, afectando negativamente sistemas productivos, tanto terrestres como marinos. Estos cambios han impactado la productividad de los sistemas agrícolas y a través de ella tanto las condiciones de vida individuales como de nuestras sociedades completas (IPCC, 2022).

Lo excepcional de este proceso ha sido puesto en relevancia por la comunidad internacional, lo que ha movilizado esfuerzos globales para poner en marcha iniciativas de adaptación para limitar los impactos que estos procesos de cambio climático generan sobre sus sistemas de



vida y productivos, así como también para limitar las emisiones antropogénicas de CO₂ (mitigación).

3.2 Situación actual de las proyecciones climáticas

Con el objetivo de informar las acciones de los tomadores de decisión del mundo, la comunidad científica ha movilizado significativos esfuerzos para comprender y proyectar los mecanismos de acción del clima, sus impactos y posibles trayectorias futuras. El más relevante de estos esfuerzos se organiza bajo la tutela del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático o IPCC por sus siglas en inglés. Este organismo es mandatado con el rol de generar información relevante para guiar los esfuerzos globales de acción contra el cambio climático. El principal producto de este esfuerzo son los *Assessment reports* que el organismo libera con cierta periodicidad. Estos buscan reflejar el consenso de todos los países miembros del IPCC respecto al estado del arte y avances de la ciencia del cambio climático y sus impactos.

Para alimentar este esfuerzo, el IPCC se apoya en el trabajo organizado por el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés) el cual engloba esfuerzos para el desarrollo de distintos Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés) enfocados en reflejar y proyectar el comportamiento climático global bajo distintas trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero.

El más actual de los reportes del IPCC, el AR6 (Assessment Report 6), utiliza los esfuerzos de la sexta iteración del CMIP, el cual se expande sobre los esfuerzos del CMIP5, reutilizando los principales entregables de esa iteración, las Trayectorias de Emisiones conocidas como RCP (Representative Concentration Pathways) pero incorporando en sus análisis un set paralelo de modelos conocidos como SSP (Shared Socioeconomic Pathways o trayectorias socioeconómicas compartidas).

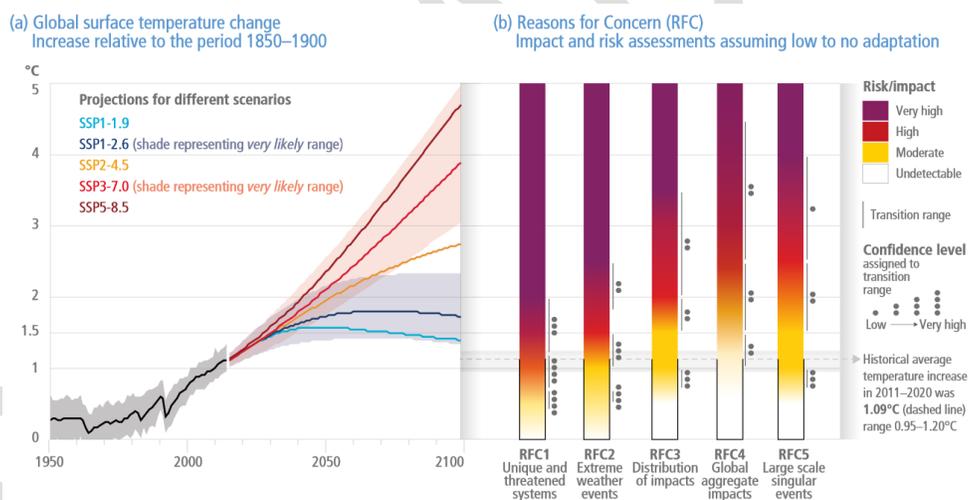
El objetivo principal de los RCP fue entregar un mapeo del completo abanico de trayectorias de emisiones de GEI antropogénicas factibles de ocurrir durante el siglo XXI, estableciendo por medio de estas trayectorias los cambios de concentración de los gases forzantes del efecto



invernadero en la atmósfera y de este modo el aumento total de la temperatura media del planeta sobre niveles preindustriales.

Sobre estos esfuerzos de modelación, se realizó una extensa revisión bibliográfica con el fin de determinar los impactos en los que distintos niveles de aumento de la temperatura media se traducirán a futuro. Estos hallazgos son sistematizados en cada ciclo de *Assessment reports*, separándose el esfuerzo en tres grupos de trabajo, cada uno enfocado en una temática entre las bases físicas del cambio climático; impactos, adaptación y vulnerabilidad al cambio climático y finalmente mitigación del cambio climático, realizando cada uno un acabado análisis de la intensidad y frecuencia del set de impactos asociados a estos distintos niveles de calentamiento global.

Figura 3-1. comparación entre Cambio de temperatura global media relativa a 1850-1900 y estimación de riesgo para distintos impactos bajo distintos escenarios futuros.



Fuente: detalle de Figura SPM3. – SPM Impacts, Adaptation and Vulnerability – WG2 - AR6 – IPCC (IPCC, 2022).

En relación a la quinta iteración de este proceso (durante la cual se produjeron los RCP), es importante destacar que estas trayectorias climáticas fueron construidas de manera independiente a la dimensión social, sin utilizar narrativas socioeconómicas que explicaran cada escenario. Más bien, el proceso fue pensado para que distintas modelaciones socioeconómicas, elaboradas de manera paralela, tuvieran a su disposición un RCP



equivalente a sus trayectorias particulares, pudiendo así un mismo RCP ser asociado a varias narrativas socioeconómicas.

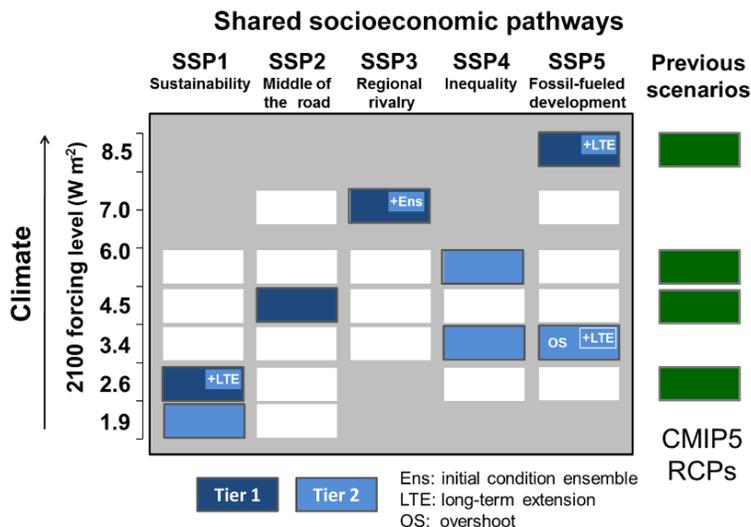
Dado este contexto, los SSP tienen como objetivo precisamente complementar los esfuerzos de modelamiento climático presentes en las RCP, adicionando la dimensión socioeconómica al análisis mediante un cruce entre el abanico de trayectorias climáticas presentes en los RCP y un abanico de narrativas de desarrollo social que reflejan distintos niveles de dificultad para superar los desafíos de adaptación y mitigación necesarios para lograr dichas trayectorias de emisiones de GEI.

Para lograr esto, cada SSP se funda en una narrativa de las posibles decisiones que las sociedades pueden tomar en el mediano plazo tanto a nivel de cooperación como de desarrollo económico, las cuales son incorporadas dentro de los modelos de evaluación integrados (IAM) a través de los distintos indicadores sociales que describen aspectos como crecimiento económico, expansión demográfica o variaciones en escolaridad y desigualdad. Finalmente, estas trayectorias son traducidas mediante supuestos compartidos de política pública (Shared Policy Assumptions o SPA) a indicadores de facilidad de adaptación (como la facilidad para el desarrollo de capacidades, presentado por ejemplo mediante la presencia y tamaño de un fondo global de adaptación o el nivel de desarrollo de un seguro internacional para impactos climáticos) y mitigación (como tasa anual de mitigación de emisiones, intensidad energética del PIB o tendencias en el desarrollo de la matriz energética primaria).

Para comunicar y explorar la multitud de cambios e impactos que el cambio climático puede generar dentro del abanico de trayectorias de emisiones que el planeta puede tomar, el IPCC utiliza cuatro “escenarios representativos”, donde cada uno está compuesto por una dupla de una posible trayectoria de emisiones de los RCP y una narrativa socioeconómica de los SSP. La figura siguiente ejemplifica este esfuerzo, donde los antiguos escenarios representativos elaborados durante el CMIP5 se presentan en verde como un abanico “unidimensional” de narrativas, mientras que los nuevos escenarios se distribuyen tanto en la dimensión climática, descrita por los distintos niveles de forzamiento a 2100, como la dimensión social, descritas por las 5 grandes narrativas que engloban los SSP.



Figura 3-2. Interrelación entre trayectorias representativas de RCP y SSP en el marco del CMIP6



Fuente: (O'Neill et al., 2016)

En conjunto, estos escenarios cubren un amplio espectro del total de futuros que son factibles de ocurrir, desde escenarios cercanos a los +5°C hasta escenarios sustancialmente inferiores a los +2°C, de acuerdo con el total de emisiones de GEI que se produzcan. No obstante, es importante destacar que el IPCC no asocia probabilidades de ocurrencia a estos escenarios.

En relación a la adaptación, esta ha cobrado un rol más relevante con cada iteración de estos reportes, pasando de comprender un único capítulo en el AR4 a poseer 4 capítulos dedicados a la temática en el AR5 y finalmente pasar a tratarse como un tema central abordado transversalmente en el reporte del grupo de trabajo II dentro del AR6.

Adaptación, en el contexto de cambio climático, se refiere a la reducción de riesgos climático y vulnerabilidad a través del ajuste de los sistemas actuales, existiendo usualmente varias opciones cuya implementación depende de la capacidad efectiva de gobiernos y tomadores decisiones de actuar de modo de crear las condiciones habilitantes para apoyar un desarrollo climáticamente resiliente.

El conocimiento respecto a adaptación se ha expandido significativamente en esta última iteración, aunque aún prevalezcan relevantes lagunas de información. La planificación e implementación de iniciativas de adaptación se ha expandido de manera relevante, de la mano de la mayor conciencia pública y gubernamental de los riesgos del cambio climático. No



obstante, la evidencia disponible basta para aseverar que todavía existen significativas brechas de adaptación, siendo gran parte de los esfuerzos actuales enfocados en planificación más que en implementación.

Gran parte de los planes de adaptación identificados a su vez representan esfuerzos incrementales más que transformacionales a pesar de que se encuentran cerca de sus límites de adaptación, siendo algunos de estos esfuerzos considerados como mal adaptativos al incrementar algunos riesgos relacionados al clima aun cuando puedan reducir otros.

Ciertas condiciones habilitantes también presentan brechas, como lo es el caso de las finanzas. No obstante, se observa la oportunidad de reducir los costos a largo plazo mediante la acción oportuna y mancomunada en el futuro cercano por parte de gobiernos, la sociedad civil y actores privados a escalas significativamente mayores a las observadas en la actualidad.

Otro avance desde la emisión del último AR refiere a la mayor evidencia que se tiene respecto al aumento de la vulnerabilidad de las personas al cambio climático asociada a la degradación y destrucción de ecosistemas. En general, las estimaciones de los daños asociados al clima crecen de manera no lineal con el aumento de la temperatura promedio global y prácticas no sustentables en el uso de recursos naturales, deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación y sus interacciones afectan adversamente la capacidad de ecosistemas, sociedades, comunidades e individuos para adaptarse al cambio climático.

En relación al sector Silvoagropecuario, con alta probabilidad, el cambio climático ejercerá una presión incremental en la producción y acceso a alimentos y nutrición, aumentando la frecuencia y severidad de sequías, inundaciones y olas de calor.

Se espera un aumento en los niveles de inseguridad alimentaria, que bajo escenarios de nula o baja adaptación, pasa de moderada a elevada para aumentos de 1.5 a 2 grados Celsius de temperatura.

Frente a estos riesgos, la mayoría de los esfuerzos de adaptación observados son fragmentados, pequeños en escala, incrementales, poco transversales, enfocados en el corto plazo y desigualmente distribuidos, encontrándose las mayores brechas de adaptación



asociados a grupos de bajos ingresos. Es más, se estima que bajo las actuales tasas de implementación, la brecha de adaptación se expanda en el futuro.

No obstante, se menciona que medidas efectivas de adaptación, en conjunto con políticas públicas adecuadas pueden aumentar la disponibilidad de alimento y su estabilidad, reduciendo los riesgos climáticos, al mismo tiempo que aumenta la sostenibilidad de los procesos asociados. Estas medidas incluyen mejoras en los sistemas de cultivo, de agroforestería, adaptación a nivel comunitario o de finca, y la diversificación del paisaje. En general, aproximaciones de manejo basadas en ecosistemas apoyan la seguridad alimentaria, nutrición salud y bienestar, así como los modos de vida, la biodiversidad, la sustentabilidad de los sistemas y los servicios ecosistémicos, los cuales incluyen control de plagas, polinización, acción de buffer para temperaturas extremas y la captura y secuestro de carbono.

3.3 Modelos y su aplicación al sector agrícola

Como se comentó anteriormente, los modelos son una herramienta central del trabajo para estimar los principales impactos del cambio climático y las posibles vías de acción frente a este. Estos varían ampliamente en complejidad y alcance de acuerdo a sus objetivos, pudiendo un modelo ser a su vez la interconexión de múltiples modelos de alcance más acotado.

Aunque los esfuerzos de modelación son realizados mediante variedad de modelos y equipos de trabajo distintos, estos mantienen un alto nivel de coordinación, alineando sus esfuerzos y objetivos a nivel de comunidad. La tabla a continuación muestra a modo de ejemplo los distintos modelos y equipos que participaron inicialmente para la elaboración de los escenarios SSP.

Tabla 5-1. Listado selecto de IAM

Nombre Modelo (institución patrocinante)	Categoría del Modelo	Algoritmo de solución
AIM/CGE (NIES)	Equilibrio general	Recursivo dinámico
GCAM (PNL)	Equilibrio parcial	Recursivo dinámico
IMAGE/TIMER (PBL)	Equilibrio parcial	Recursivo dinámico



Nombre Modelo (institución patrocinante)	Categoría del Modelo	Algoritmo de solución
MESSAGE-GLOBIOM (IIASA)	Equilibrio general	Optimización Intertemporal
REMIND-MAgPIE (PIK)	Equilibrio general	Optimización Intertemporal
WITCH-GLOBIOM (FEEM)	Equilibrio general	Optimización Intertemporal

Fuente: (IIASA, 2015)

Las dos categorías de modelos refieren a si la búsqueda de una solución considera el ajuste de todas las variables relevantes al mismo tiempo (equilibrio general) o acaso trata algunas variables como constantes al momento de ajustar otras (equilibrio parcial). Las diferencias en los algoritmos de solución refieren a si acaso el modelo busca una solución óptima global a través de todos los periodos de tiempo representados, o acaso la solución óptima para un periodo temporal es utilizada como condición de entrada para el siguiente periodo y así sucesivamente.

Estos modelos buscan integrar las distintas dimensiones relacionadas con el desarrollo del cambio climático antropogénico y sus impactos. En algunos casos, y tal como los nombres de los modelos listados permiten suponer, algunos de estos modelos corresponden a ensamblajes de submodelos enfocados en representar distintos sistemas más puntuales. Una de las dimensiones principales a ser abordadas por estos modelos corresponde al tratamiento de los sistemas ecológicos y agroecológicos, para lo cual existen distintas metodologías. En particular, son relevantes para los objetivos de este trabajo describir brevemente el subconjunto de enfoques para representar las dimensiones del sector SAP incluidas en estos estudios, para lo cual el siguiente acápite realiza una revisión de la dimensión silvoagropecuaria de algunos modelos selectos de este listado.

3.3.1 Modelación de impactos en el sector silvoagropecuario

Una dimensión relevante de los alcances que son atendidos en los modelos climáticos es aquella relacionada con el sector agrícola y en general, con el uso o cambio de uso de suelo. Las actividades relacionadas con el sector silvoagropecuario no solo son influenciadas por las



trayectorias socioeconómicas que ocupan estos modelos, sino que también presentan cambios y respuestas a las variaciones climáticas al mismo tiempo que también contribuyen a la forma y magnitud del cambio climático antropogénico y de variedad de otros impactos, incluyendo aquellos hacia los ecosistemas naturales con los que compiten por suelo y la magnitud del impacto sobre otros límites planetarios.

El tratamiento de la dimensión Silvoagropecuaria requiere tanto la estimación de los rendimientos de los distintos productos de relevancia económica y social considerados en cada modelo, los cuales dependen de las condiciones climáticas y deben por ende ser ajustados para cada escenario de cambio climático, como también de la estimación de la demanda de acuerdo a los indicadores socioeconómicos y finalmente a los cambios de uso de suelo que las dinámicas de satisfacción de la demanda empujen. Algunos de estos factores pueden ser resueltos internamente por cada modelo (i.e. de manera endógena), mientras otros pueden ser alimentados a partir de bases de datos (i.e. de manera exógena) u otros modelos acoplados dentro del modelo global.

Con el fin de ejemplificar la forma que estos modelos resuelven el problema de asignación de uso de suelo y satisfacción de demanda, a continuación, se realiza una pequeña descripción de algunas metodologías selectas para el sector agronómico o silvopecuario en general . Una revisión más detallada se puede obtener en (Hutchinson & Gomes, 2021).

3.3.1.1 Metodología de zonas agroecológicas (AEZ)

En los modelos de zonas agroecológicas, los cultivos se clasifican en varias zonas agroecológicas y luego se predicen los rendimientos. Estos combinan los modelos de simulación de cultivos con el análisis de decisiones sobre el uso de la tierra, y modelan los cambios en los insumos y las variables climáticas para evaluar los cambios en la producción agrícola. Estos suponen que el uso de la tierra podría cambiar de una clasificación de zona agroecológica a otra con los cambios en las condiciones ambientales, donde posteriormente modelos económicos pueden proyectar los cambios y efectos globales en la producción de oferta.



El análisis de la respuesta de cultivos se apoya en modelos de simulación de cultivos como el Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), el modelo de World Food Studies (WOFOST) y la Metodología revisada de la FAO Methodology for Crop Water Requirements (CROPWAT), tomando la interacción de las relaciones de respiración y fotosíntesis de las plantas para estimar los efectos potenciales de los cambios en los datos del suelo, las plantas y el clima, apoyándose también en datos experimentales para determinar los impactos potenciales en el crecimiento de las plantas. Así, los modelos AEZ muestran los cambios esperados en cultivos como resultado de los cambios en las zonas agroecológicas.

Una de las mayores ventajas asociadas a la utilización de zonas agroecológicas es que se encuentra publicada información relativa a la distribución geográfica de las zonas agroclimáticas en gran número de países, incluso aquellos en vías de desarrollo. Sin embargo, este tipo de modelos enfrenta una serie de dificultades. Las zonas climáticas suelen representarse con un elevado nivel de agregación, por ejemplo, en rangos de temperatura, de modo que en algunos casos, cambios sutiles dentro de una zona no son observables, mientras que cambios pequeños que suceden en el margen entre una zona y otra pueden tener consecuencias considerables. Adicionalmente, los efectos de los suelos y del clima se calculan de forma independiente, lo que ignora la interrelación entre estas variables. Al igual que con otros modelos agroecológicos, estos modelos presentan barreras para abordar explícitamente las posibles medidas de adaptación. Adicionalmente, sectores que no pueden ser representados directamente mediante expresiones agrícolas, como el ganadero, resultan complejas de incorporar en estos modelos, siendo esta otra desventaja a la hora de abordar modelaciones generales del sector SAP.

Algunos de los modelos de este tipo se han desarrollado a escala global, como el de Golub et al (2007), quienes estiman un modelo vinculado de oferta y demanda de tierras a nivel mundial utilizando un cálculo de equilibrio general dinámico, que predice el crecimiento económico de cada región del mundo basándose en proyecciones exógenas de población, mano de obra cualificada y no cualificada y cambio técnico, y que diferenciaba la demanda de tierras por zonas agroecológicas.



Por otra parte, el modelo GAEZ, desarrollado conjuntamente por la FAO y el Instituto Internacional de Análisis de Ciencias Aplicadas (IIASA), se ha basado en más de 30 años de trabajo e incorpora información climática, socioeconómica como la densidad de población, el acceso al mercado, el tipo de suelo, la pendiente, la capacidad de retención de agua y la susceptibilidad a plagas y enfermedades.

3.3.1.2 Modelo de cultivos agroeconómicos

Estos modelos combinan el análisis de impactos en rendimiento y distribución de cultivos y sistemas agrícolas frente a impactos medioambientales, con la influencia que estas variaciones tienen sobre otros sistemas socioeconómicos como, por ejemplo, consecuencias sobre la demanda de productos agrícolas, o sobre la competencia por insumos como el agua. En este sentido, los resultados de los modelos de simulación de cultivos y de zonas agroecológicas (AEZ) se pueden utilizar como un primer paso que, sumado a un análisis de impacto socioeconómico, dan origen a estos modelos agroeconómicos.

3.3.1.3 Modelos Ricardianos

Los modelos ricardianos utilizan el análisis econométrico para estimar la relación entre las rentas productivas y las principales variables climáticas. Esta evaluación se basa en datos a nivel de finca en base a niveles de producción y precios de los productos, contra los costos de la mano de obra, insumos, otros costos de capital y variables climáticas como precipitación, temperatura media o condición del suelo.

Dado que se utilizan datos a nivel de explotación individual, los efectos del cambio climático en el modelo ricardiano se determinan a partir de los cambios en la producción de las explotaciones situadas bajo distintas condiciones climáticas (con distintas combinaciones en los parámetros del suelo y el clima). Estos modelos suponen que, a medida que cambian los costes de los insumos, los productores maximizan las rentas (o los beneficios) cambiando los patrones de producción, un comportamiento que refleja una adaptación a los cambios en las condiciones climáticas (Patt y otros, 2010). De este modo, se incorpora implícitamente la adaptación, ya que los productores pueden utilizar una serie de enfoques, como cambiar el tipo de cultivos o de ganado, cambiar las variedades de cultivos o las razas de ganado, cambiar



los tiempos de siembra o cambiar sus sistemas de producción (empleando tecnologías duras o blandas adicionales y/o diferentes) o sector productivo (incluyendo los distintos rubros del sector SAP).

3.3.1.4 Modelos de funciones de producción

Los modelos de funciones de producción buscan caracterizar el rendimiento potencial de distintos cultivos mediante el ajuste de distintas funciones específicas para cada caso. Estas funciones reflejan las condiciones ambientales mediante distintos parámetros (e.g. las condiciones de temperatura pueden ser reflejadas mediante la temperatura promedio y/o la temperatura máxima y mínima registrada) y junto a otras variables como las distintas intensidades de uso de insumos (ej: fertilizantes, mano de obra y/o agua) calculan mediante una expresión matemática los resultados esperados de sus cultivos bajo las condiciones especificadas.

Debido a que las variables consideradas pueden recibir distintos valores, estas expresiones pueden ser utilizadas para estimar el impacto de variaciones ambientales producto del cambio climático en el rendimiento de cultivos mediante la variación equivalente de los parámetros de entrada. A su vez las medidas de adaptación que sean factibles de ser traducidas dentro de los parámetros utilizados pueden ser incorporadas a estos modelos, permitiendo un análisis conjunto tanto de los impactos como de las medidas de adaptación.

Adicionalmente, estas expresiones pueden ser utilizadas como insumo para realizar análisis comparativos de distintos cultivos en base a las ventajas que cada uno presenta para distintas condiciones según sus distintas funciones de producción.

3.3.1.5 Modelos computacionales de optimización

Los modelos computacionales de optimización sacan provecho de los avances en sistemas de información geográfica y los aumentos en velocidad de cálculo y nivel de complejidad abordable por los computadores modernos para definir y resolver las distintas dimensiones del fenómeno agroeconómico y silvoagropecuario en general de manera conjunta. Estos incorporan tanto endógena o exógenamente distintas dimensiones del problema de producción y demanda de productos provenientes del sector SAP como aspectos agro-físicos,



climáticos, económicos y sociales, pudiendo modelar a su vez los impactos mutuos entre estos sistemas productivos y los ecosistemas globales y los sistemas socioeconómicos con los que interactúan. La tabla a continuación presenta un listado de modelos que incluyen algún tratamiento de la dimensión silvoagropecuaria y climática, clasificados según su tratamiento del problema de asignación de uso de suelo.

Tabla 5-2 Listado referencial de modelos de asignación de uso de suelo.

Nombre	Eq.*	Modelo de uso de suelo	Estudio Referencial
FASOM	PE	Constrained optimization	Beach and McCarl (2010)
GLOBIOM	PE	Constrained optimization	Havlik et al. (2011)
MAGPIE	PE	Constrained optimization	Lotze-Campen et al. (2008)
MAGNET	GE	CET	Kavallari et al. (2014)
GTEM	GE	CET	Ahammad and Mi (2005)
ENVISAGE	GE	CET	van der Mensbrugge (2010)
GTAP-BIO	GE	CET	Hertel et al. (2010)
MIRAGE	GE	CET	Al-Riffai et al. (2010)
LEITAP	GE	CET	Verburg et al. (2009)
ENVISAGE	GE	ACET	van der Mensbrugge and Peters (2016)
PHAGE	GE	ACET	Mariano and Giesecke (2014)
MONASH-VN	GE	ACRETH	Giesecke et al. (2013)
GCAM	PE	Logit	Wise et al. (2014)
AIM	GE	Logit	Fujimori et al. (2014)
Constructed GE	GE	Ricardian	Sotelo (2017)
Constructed GE	GE	Ricardian	Costinot et al. (2016)
AgLU	PE	Ricardian/original logit	Sands and Leimbach (2003)

* Los modelos son categorizados según modo de optimización en aquellos de equilibrio general (GE) o parcial (PE)

Fuente: adaptado de (Zhao et al., 2020)

Aunque representan un salto en los niveles de complejidad para abordar la problemática del sector SAP y uso de suelo (incluyendo cambios en su uso), estos modelos presentan varias ventajas frente a las otras alternativas mencionadas. Una de estas es la capacidad de manejar explícitamente la oferta geográfica del suelo y su heterogeneidad. Para describir este fenómeno se describen brevemente a continuación 2 de estos modelos.

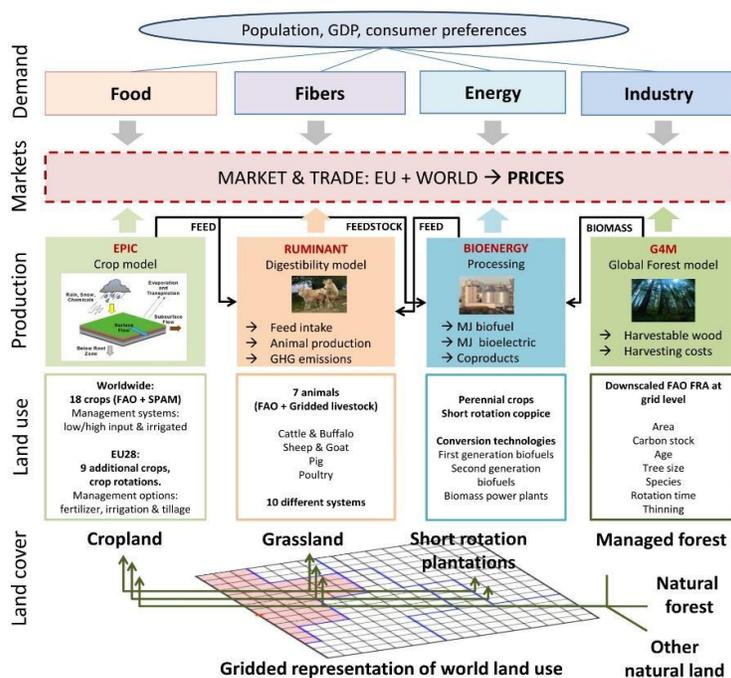
I. GLOBIOM

GLOBIOM (GLObal BIOsphere Management) es un modelo de uso de suelo de escala global que incorpora simultáneamente los sectores agrícolas, forestales y de biocombustibles. El modelo utiliza una representación de oferta geográficamente explícita incorporando en una grilla



información de distintas características locales (como tipo de suelo, condiciones climáticas locales, topografía/desnivel, cobertura/uso actual), distintas condiciones de manejo (e.g. uso de fertilizantes, irrigación) y finalmente distintos regímenes de políticas públicas relevantes. Junto con estimar los rendimientos potenciales de cada subdivisión de la grilla geográfica (en total 10.894 unidades modeladas), GLOBIOM estima la demanda de productos a nivel global, y agrupándola en base a un total de 11 regiones geográficas distintas, modelando endógenamente los precios de productos para, finalmente, optimizar matemáticamente la solución de abastecimiento y obtener así la distribución de uso de suelo asociada (y los cambios de uso de suelo correspondientes). Finalmente, el modelo estima las consecuencias ambientales de los futuros cambios de uso de suelo, incluyendo las emisiones de GEI del sector agrícola y aquellas asociadas a cambios de uso de suelo.

Figura 3-3. Esquema resumen de GLOBIOM



Fuente: https://docs.messageix.org/projects/global/en/latest/land_use/index.html

La representación espacial del planeta es alimentada con distintas bases de datos a través de las cuales se caracteriza el paisaje (en total, se consideran 5 categorías de altura, 7 categorías de pendiente y 5 categorías de calidad de suelo) para posteriormente agruparlas sobre



“unidades homogéneas de respuesta”. Estas unidades son posteriormente fraccionadas por una malla de 0.5 x 0.5 grados para delinear unidades de simulación desde las cuales se alimentan las demás condiciones (tanto climáticas como de uso de suelo y de régimen de manejo). El modelo a su vez considera un total de 30 cultivos distintos, cuatro sectores de actividad pecuaria y cinco categorías de producción forestal.

En el caso de la actividad pecuaria, el modelo caracteriza la actividad de cada sector (considerando un total de 4 sectores: bovino, pequeños rumiantes/ovejas y cabras, cerdos y apícola) en base al total de individuos por especie. Para los sectores bovino (el cual se separa producción de carne y lácteos) y pequeños rumiantes considera 8 condiciones de producción. Finalmente, el modelo calcula un nivel de rendimiento en base a los niveles de alimentación provistos.

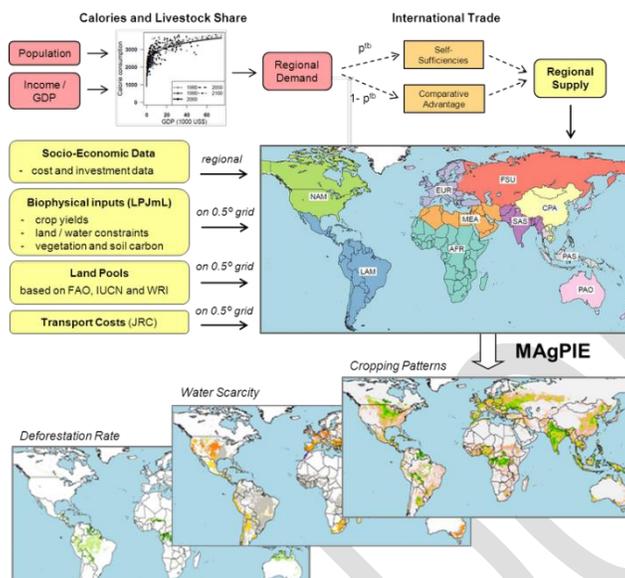
Respecto al sector forestal, se consideran 5 categorías de productos primarios (pulpa, madera aserrada, biomasa para energía, leña de uso tradicional, y madera para otros usos industriales). GLOBIOM utiliza un submodelo dedicado, G4M, para el manejo de la demanda forestal y su satisfacción.

II. MAGPIE

MAGPIE (Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment) es un modelo enfocado en la asignación global de uso de suelo. De manera similar a GLOBIOM, este considera una representación explícita de la capacidad productiva global (en escala 0.5 x 0.5 grados), considerando localmente condiciones climáticas, rendimientos potenciales y costos de producción, para así buscar una solución óptima al problema de minimizar el costo global de satisfacción de la demanda por productos del sector SAP definidas en base a proyecciones socioeconómicas para 10 regiones del planeta.



Figura 3-4. Esquema del modelo MAgPIE.



Fuente: <https://www.iamconsortium.org/resources/model-resources/magpie-model-of-agricultural-production-and-its-impact-on-the-environment/>.

La optimización se realiza de manera recursiva para periodos de 10 años, considerando 20 cultivos distintos y 3 sectores pecuarios. Los costos considerados corresponden a capital humano, insumos y otras formas de capital, todas medidas en dólares. A diferencia de GLOBIOM, MAgPIE trata los cambios tecnológicos de manera endógena, pudiendo incorporar en el proceso de optimización la “adquisición” de tecnologías que mejoren rendimientos. El modelo también mantiene un registro de las coberturas forestales y los volúmenes de carbono asociados.

3.4 Modelación De Los Impactos Del Cambio Climático

La revisión antes presentada describe aquellos esfuerzos tanto de modelación climática como de sistemas agronómicos, presentando el esfuerzo de modelación climática un considerable nivel de avance y sofisticación por sobre el trabajo de modelación agrologica. No obstante, si bien estos trabajos pueden informar el problema de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, estos no se encuentran enfocados per se en la determinación de impactos económicos o productivos.



Aunque existen trabajos enfocados explícitamente en la estimación de los impactos del cambio climático (incluyendo costos de la inacción, estimaciones del costo social del carbono y estimaciones del “valor en riesgo”), estos presentan niveles de detalle y complejidad sustancialmente menores que aquellos trabajos mencionados anteriormente. Aunque existen esfuerzos recientes en esta materia que presentan mayores niveles de detalle, esta es aún un área de investigación en desarrollo. Para enmarcar el estado actual de estos esfuerzos, se hace una breve descripción de algunos trabajos fundacionales en estas materias.

3.4.1 PAGE, FUND, DICE

Comúnmente, los alcances económicos incluidos en los distintos modelos de evaluación integrados o IAMs no están enfocados en la estimación del costo económico de los impactos del cambio climático. Esto configuró un nicho para que un conjunto de esfuerzos buscara generar estimaciones específicas del costo del cambio climático. Los primeros de estos modelos consideran el cambio climático como externalidad negativa, asociando la actividad económica a un cierto nivel de emisiones de GEI que luego es transformado en un aumento global y local de la temperatura promedio, la cual es posteriormente traducida en alguna medida a impactos económicos en los distintos sectores. A continuación, se entrega una breve revisión de tres modelos que abordan esta problemática y presentaron una influencia importante ya sea a nivel académico o político. Una revisión más detallada de estos modelos se puede obtener en (Bonen et al., 2014).

El primero de estos modelos, Dynamic Integrated model of Climate and the Economy o DICE, cobró notoriedad por ser utilizado por su creador, William Nordhaus, en el trabajo que le valdría un premio nobel de economía. DICE funciona como un modelo de optimización Intertemporal donde una serie finita de agentes económicos homogéneos y representativos intentan maximizar su retorno en un horizonte infinito de tiempo dentro de un total de 11 regiones globales. En este esfuerzo, las emisiones de GEI son atendidas como una externalidad negativa, a la cual se asigna una función de daño que representa sus impactos económicos. El análisis de daño que realiza este modelo se realiza sobre 7 sectores económicos (siendo uno de estos el



agrícola), para los que se ajusta una función cuadrática dependiente del aumento total de la temperatura promedio, en base a una revisión bibliográfica de los impactos asociados.

El siguiente modelo, Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution o FUND, se diferencia de DICE en una serie de aspectos, incluyendo el manejo del crecimiento económico, el cual es manejado como una variable exógena en vez del resultado del proceso de optimización. Adicionalmente, en vez de utilizar una serie de parámetros predefinidos para cada análisis centrado en un ejercicio de optimización general (de una función de bienestar), FUND realiza una simulación de Monte Carlo a partir de una asignación probabilística de sus variables de inicio en el marco de una simulación recursiva. En este contexto, los impactos del cambio climático se definen en base a los niveles de emisión de CO₂, los cuales se asocian a la actividad económica mediante la identidad de Kaya:

Figura 4-3 identidad de Kaya.

$$Emisiones\ Globales\ de\ CO_2 = Población\ Global * \frac{PIB\ Global}{Población\ Global} * \frac{Consumo\ energético\ Global}{PIB\ Global} * \frac{Emisiones\ de\ CO_2\ Globales}{Consumo\ energético\ global}$$

Fuente: adaptado de (Bonnen et al., 2014)

La optimización se realiza sobre 16 regiones globales, considerando 9 funciones de daño para distintos sectores, tanto directos como indirectos. Los daños al sector agrícola poseen uno de los pesos más relevantes en este modelo para la estimación del costo social del carbono, siendo sus principales impactos considerados definidos como “ajuste a la producción agrícola”, “diferencia de la temperatura óptima de crecimiento” e “incremento de la producción por fertilización de CO₂” (mayor crecimiento de especies vegetales y producción producto del aumento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico). Similarmente a DICE, FUND considera una función cuadrática para el impacto agrícola, la cual para la mayoría de las combinaciones de parámetros aleatoriamente definidos establece una ganancia neta de productividad en el sector agrícola para pequeños aumentos de temperatura e impactos negativos para niveles mayores de calentamiento.

Finalmente, el tercero de estos esfuerzos iniciales de estimar impactos económicos del cambio climático a destacar es el Policy Analysis of the Greenhouse Effect (PAGE), el cual posee



notoriedad por ser utilizado, en su versión inicial en la elaboración del “reporte Stern”. PAGE es similar a FUND en el sentido que ambos manejan el crecimiento económico de manera exógena y utilizan muestreos aleatorios para inicializar las variables durante cada una de sus modelaciones, incorporando una dimensión de incertidumbre en sus proyecciones.

No obstante, PAGE realiza un tratamiento distinto de los costos del cambio climático. Aunque aún se mantiene lejos de realizar una descripción granular de los impactos de este, el modelo establece dos grandes categorías de daños, económicos y no económicos, los cuales dependen tanto del aumento total de la temperatura promedio como de la tasa de cambio de la temperatura, midiéndose estos daños en relación a “niveles tolerables” tanto globales como de cambio definidas para cada región (el modelo considera un total de 8 regiones). A su vez el modelo permite incorporar la noción de adaptación mediante el cambio de estas tasas tolerables por medio de variables que representan la incorporación de políticas públicas enfocadas en cada una.

Aunque estos modelos representaron un avance relevante en la discusión de los impactos del cambio climático y han tenido una influencia real en la discusión de políticas públicas de alta relevancia, como la estimación del costo social de carbono por parte del grupo Inter agencial del gobierno de Estados Unidos. Una serie de críticas relevantes fueron observadas respecto a estos. En particular, a pesar de ser construidas sobre revisiones bibliográficas extensas, las relaciones entre impactos económicos y procesos naturales se realizan de manera imprecisa. En efecto, los modelos consideran representaciones altamente agregadas de las regiones globales (al punto que DICE considera una única región global) sin una caracterización directa del paisaje.

En general, esta primera generación de IAM económicos consideran impactos pequeños sobre el total de la economía que han sido objeto de crítica en revisiones posteriores. Si bien el trabajo de Nicholas Stern basado en el modelo PAGE consideró impactos totales significativamente mayores que aquellos concluidos por el trabajo de Nordhaus en base al modelo DICE (entre un 5% y un 20% permanente de disminución en el PIB global vs un impacto del 2.1% en el PIB global a 3°C calculado por Nordhaus), incluso estos cálculos se realizan sobre



una serie de supuestos fuertes respecto a la capacidad de adaptación de la economía global. Por ejemplo, el modelo asume una alta capacidad de adaptación a bajo precio para las economías desarrolladas, incluyendo la capacidad de las economías desarrolladas de eliminar el 100% de los impactos económicos ocurridos en los primeros 3.6°F de calentamiento, el 90% de los impactos económicos para aumentos superiores de temperatura y el 25% de los impactos no económicos (Ackerman et al., 2008), lo cual, considerando la información que se posee actualmente, resulta altamente improbable.

3.4.2 Esfuerzos actuales de estimación del impacto económico del cambio climático

Posterior al desarrollo de estos modelos de primera generación, han proseguido los esfuerzos de modelación de impactos económicos, haciendo provecho de las nuevas capacidades de manejo computacional para sistemas de información geográfica y sistemas de alta complejidad en general.

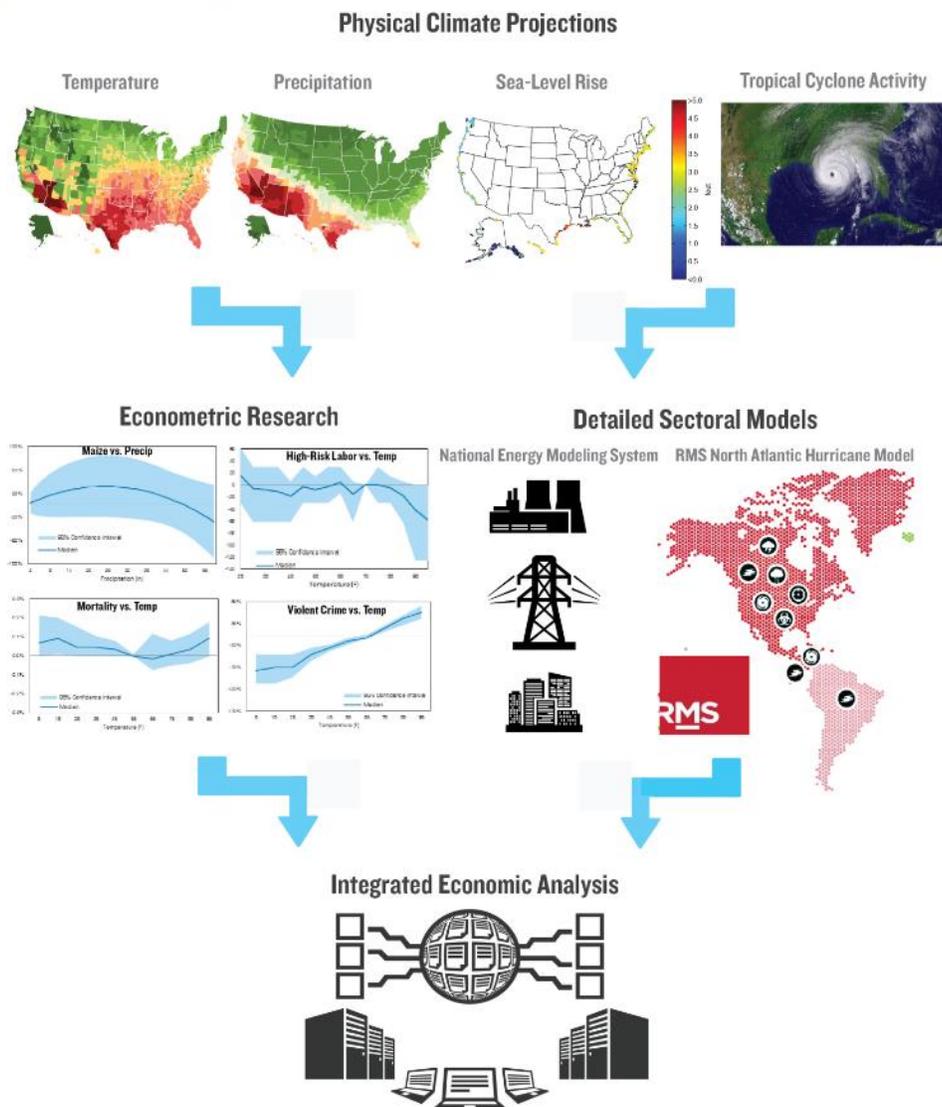
Algunos de estos esfuerzos se han centrado en la utilización de innovaciones metodológicas para el manejo y agrupación de extensos conjuntos de información estadística, en variedad de sectores socioeconómicos, para estandarizar los impactos del cambio climático en estos, mediante funciones de respuesta. Estos trabajos permiten establecer relaciones no lineales empíricas sobre los efectos del cambio climático (Burke et al., 2015). A nivel de sistemas silvoagropecuarios, entre los resultados obtenidos por estas sistematizaciones, se cuenta la relevancia de las olas de calor en los rendimientos de cultivos tradicionales, incluso por sobre aquellos efectos de eventos de precipitación extremos (Carleton & Hsiang, 2016).

Otros esfuerzos han sido elaborados sobre estos análisis estadísticos y econométricos sobre impactos económicos del cambio climático, incorporando adicionalmente sistemas explícitos de información geográfica y esquemas detallados de sectores económicos dentro de modelos de análisis integrados. Específicamente, un ejemplo de esta clase de modelos, Spatial Empirical Adaptive Global-to-Local Assessment System (SEAGLAS), fue construido para el caso norteamericano en un trabajo colaborativo entre la universidad de Columbia, la universidad de Rutgers y la consultora Rhodium Group. El reporte entregado por este trabajo, titulado

“American Climate Prospectus”, estimó un impacto económico de 1.2% del PIB para la economía estadounidense por cada grado Celsius de aumento en la temperatura promedio, significativamente superior que los análisis realizados por Nordhaus en el modelo DICE.

Figura 3-5. Esquema gráfico del modelo SEAGLAS

Figure I.I: Spatial Empirical Adaptive Global-to-Local Assessment System (SEAGLAS)

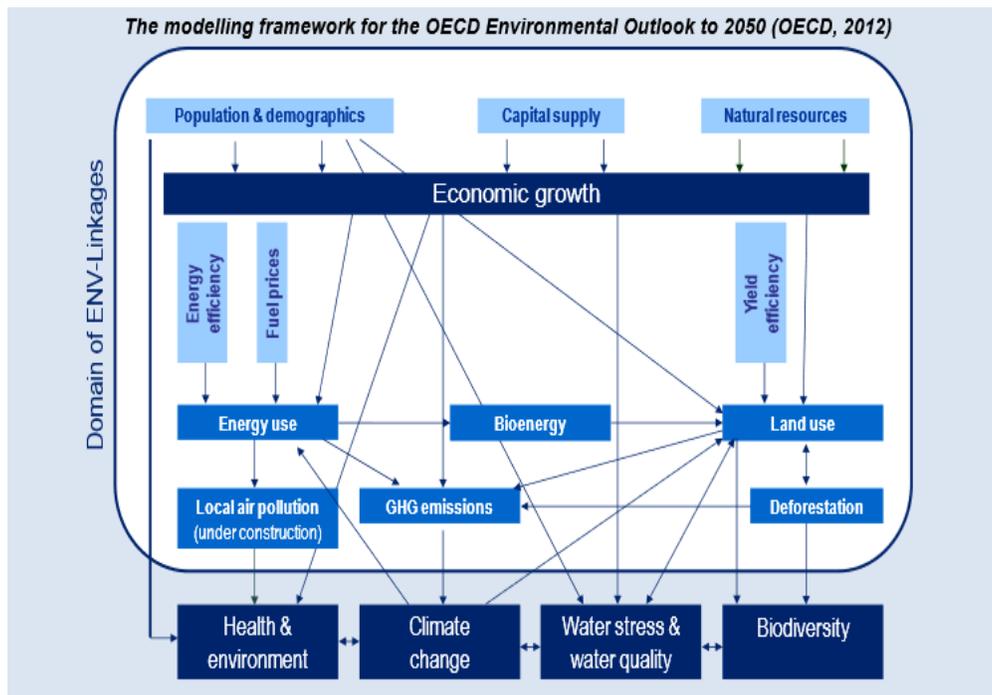


Fuente: American Climate Prospectus, 2015

Otros esfuerzos relevantes en este ámbito cuentan el modelo ENV-LINKAGES desarrollado por la OCDE para sus esfuerzos de análisis ambiental-económico. Este modelo realiza un análisis regionalmente distribuido, con cada país perteneciente a la OCDE representado por una región

propia. El reporte “The Economic Consequences of Climate Change” realizado en base a este modelo entrega un impacto total al 2060 cercano a -1% del PIB para la economía chilena, considerando un impacto neto positivo para el sector agricultura (OECD, 2015).

Figura 3-6. Esquema gráfico modelo ENV-Linkages



Fuente: (OECD, 2013)

La cuantificación de los impactos en este modelo se realiza a partir de información secundaria, derivada principalmente a partir de modelos “bottom-up” de equilibrio parcial. En particular, para los impactos sobre el sector agrícola el modelo utiliza información proveniente del proyecto AgMIP según fue utilizado en el modelo integrado de evaluación IMPACT.

El proyecto AgMIP es igualmente de interés para este trabajo, en cuanto representa un esfuerzo global por estandarizar los trabajos de proyección de los cambios en los cultivos de mayor relevancia económica a nivel global. Este proyecto desarrolla a su vez herramientas para la obtención de rendimientos proyectados para variedad de cultivos y escenarios climáticos futuros de manera geográficamente explícita a través de la utilidad [AgMIP Tool](#).



Finalmente, se puede destacar cómo el desarrollo de modelos de impacto económico del cambio climático ha avanzado fuera de espacios meramente gubernamentales o académicos. Un ejemplo de esto es el modelo D.Climate de la consultora Deloitte, el cual fue utilizado para la elaboración del informe “A new economic climate in the United States”. Este establece de manera explícita una serie de sectores de la economía estadounidense, realizando un análisis en 7 subregiones de este país y concluyendo un impacto equivalente a un PIB un 5% más bajo hacia 2070 por efecto del cambio climático (Deloitte, 2021).

3.5 Análisis y consideraciones para la determinación metodológica del trabajo

La revisión antes presentada entrega una cartografía de los distintos esfuerzos existentes para la representación de los impactos del cambio climático, la cual ha destacado múltiples dimensiones relevantes a la hora de establecer una metodología para el análisis de estos impactos. Una de estas dimensiones consiste en el nivel de detalle geográfico para representar tanto oferta como demanda de productos del sector SAP, existiendo antecedentes para su tratamiento que van desde la representación geográficamente explícita y con elevado nivel de granularidad, hasta su tratamiento de manera agregada a nivel continental. Otra dimensión relevante corresponde al tratamiento endógeno o exógeno de distintas variables relevantes para el análisis, como los niveles de demanda o los precios de equilibrio para los distintos productos. De igual forma, la representación de los impactos económicos puede hacerse de manera directa mediante funciones de producción explícitas o puede ser aproximada mediante ajustes basados en la literatura. Todas estas son aproximaciones válidas en cuanto respondan a los objetivos del esfuerzo dentro del cual se realizan, no siendo necesariamente el modelo más complejo el más adecuado para los fines de cada estudio. A su vez, algunos modelos que pueden atender eficazmente a algunos fenómenos del universo agroclimático pueden presentar barreras a la hora de incorporar el análisis de adaptación, rindiéndose inadecuadamente para un estudio enfocado en este objetivo. Por este motivo, el desarrollo de la metodología que se presenta a continuación se ha alimentado del esfuerzo de caracterización antes realizado y, habiendo identificado las fortalezas o limitaciones de las



distintas alternativas identificadas, ha buscado equilibrar los distintos aspectos relevantes en atención a los objetivos del estudio.

Tabla 3-1. Resumen comparativo de distintas aproximaciones metodológicas.

Aproximación Metodológica	Capacidad de representar Sectores SAP	Capacidad de proyectar impactos en producción por cambio climático	Capacidad de modelar impactos económicos	Facilidad para incorporar adaptación
Zonas agroecológicas	Robustes para representar cultivos más limitaciones para otros sectores	Factibilidad para representar cambios en condiciones climáticas	Limitada	Limitada en cuanto estos modelos no son capaces de incorporar procesos ajenos a aquellos propios del crecimiento de cultivos.
Modelo de cultivos agroeconómicos	Robustes para representar cultivos más limitaciones para otros sectores	Factibilidad para representar cambios en condiciones climáticas	Factibilidad de incorporar impactos económicos	Limitada en cuanto estos modelos sólo permiten extrapolar el impacto de dimensiones propias del crecimiento de cultivos y la comercialización de las especies producidas.
Modelos Ricardianos	Factibilidad para representar variedad de sectores mientras se disponga de información empírica suficiente	Limitada. Permite incorporar impacto de variaciones climáticas siempre y cuando existe información empírica que permita aproximar dichas condiciones	Factibilidad de incorporar impactos económicos en cuanto puedan ser extrapolados a partir de información empírica.	Limitada en cuanto estos modelos sólo permiten extrapolar fenómenos que puedan medir empíricamente.
Modelos de funciones de producción	Factibilidad para representar variedad de actividades.	Factibilidad para representar cambios en condiciones climáticas	Factibilidad de incorporar impactos económicos si se incorpora información de costos y precios de productos.	Factible en cuanto los impactos de la adaptación puedan ser incorporados en las funciones que sean utilizadas en cada caso.



Aproximación Metodológica	Capacidad de representar Sectores SAP	Capacidad de proyectar impactos en producción por cambio climático	Capacidad de modelar impactos económicos	Facilidad para incorporar adaptación
Modelos computacionales de optimización	Alta capacidad de presentar variedad de actividades a cambio de un elevado nivel de complejidad	Factibilidad para representar cambios en condiciones climáticas	Factibilidad de trabajar endógenamente impactos económicos.	Alta factibilidad a cambio de un elevado nivel de complejidad

Fuente: Elaboración propia

4 METODOLOGÍA

La revisión realizada como preámbulo a este documento destacó una serie de dimensiones relevantes a la hora de seleccionar o construir herramientas para el análisis y descripción de la interacción entre el cambio climático y los sistemas naturales y socioeconómicos.

Seleccionar qué se incluye y qué no en un modelo, es una instancia más de la construcción del mismo, entendido este proceso como un ejercicio de abstracción de un fenómeno de interés, donde una división debe ser trazada entre los aspectos de dicho fenómeno que serán observables y reproducibles por el modelo, y aquellos aspectos que inevitablemente deberán quedar fuera, para lograr simplificar el completo abanico de complejidad presente en el objeto de interés real.

Este paso inicial debe ser atendido visualizando los objetivos a los que responde la construcción de dicha herramienta y, sobre este principio, observar las distintas posibilidades que las herramientas e insumos disponibles permiten con los recursos asignados. Las próximas secciones de este documento buscan, por lo tanto, describir las características metodológicas de la herramienta ideada para los objetivos de este estudio, y argumentar el porqué de las decisiones tomadas en este proceso.



4.1 Objetivo del estudio

La adaptación al cambio climático busca reducir la vulnerabilidad tanto de los sistemas naturales como humanos, por medio de la adopción de una serie de acciones o medidas que atenúen los impactos negativos de este fenómeno o potencien aquellos positivos.

En el caso chileno, los esfuerzos en este ámbito se enmarcan a nivel nacional en documentos como la actual Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) o el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, instrumento que determina la estructura institucional nacional y que articula una serie de planes sectoriales de adaptación, incluyendo al sector silvoagropecuario.

En 2013, el Ministerio de Agricultura (MINAGRI) elaboró el Plan de Adaptación Nacional al Cambio Climático para el Sector Silvoagropecuario, que definió 21 medidas centradas principalmente en la gestión del agua, la investigación, la información y la creación de capacidades, la gestión de riesgos y los seguros agrícolas y la gestión forestal.

Actualmente, este proceso se encuentra en actualización, considerando una estrategia de priorización secuencial y participativa que atienda en esta iteración al cierre de una serie de brechas identificadas respecto al plan anterior. En particular, según lo establecido en las bases de licitación, estas brechas mencionan “la falta de un plan de inversión y una estrategia específica para la movilización de recursos”, “la falta de metas, líneas base e indicadores” y “debilidades en la participación de los actores involucrados”. Complementariamente, las etapas de priorización secuencial mencionan, tras una etapa inicial de proceso participativo, la evaluación económica de las medidas levantadas.

4.1.1 Objetivo principal del trabajo

En este contexto, el trabajo abordado tiene el objetivo de suplir las brechas asociadas al proceso antes mencionado. En particular, el objetivo de esta consultoría es el siguiente:

Elaborar y aplicar una metodología de baja complejidad para la construcción de indicadores económicos, la estimación económica de costos de las medidas y del Plan y la construcción de



una estrategia financiera, en el contexto del esfuerzo de adaptación para reducir la vulnerabilidad del sector silvoagropecuario (SAP) a los impactos del cambio climático.

El esfuerzo descrito se puede descomponer en una serie de objetivos particulares, los cuales se describen en la siguiente lista:

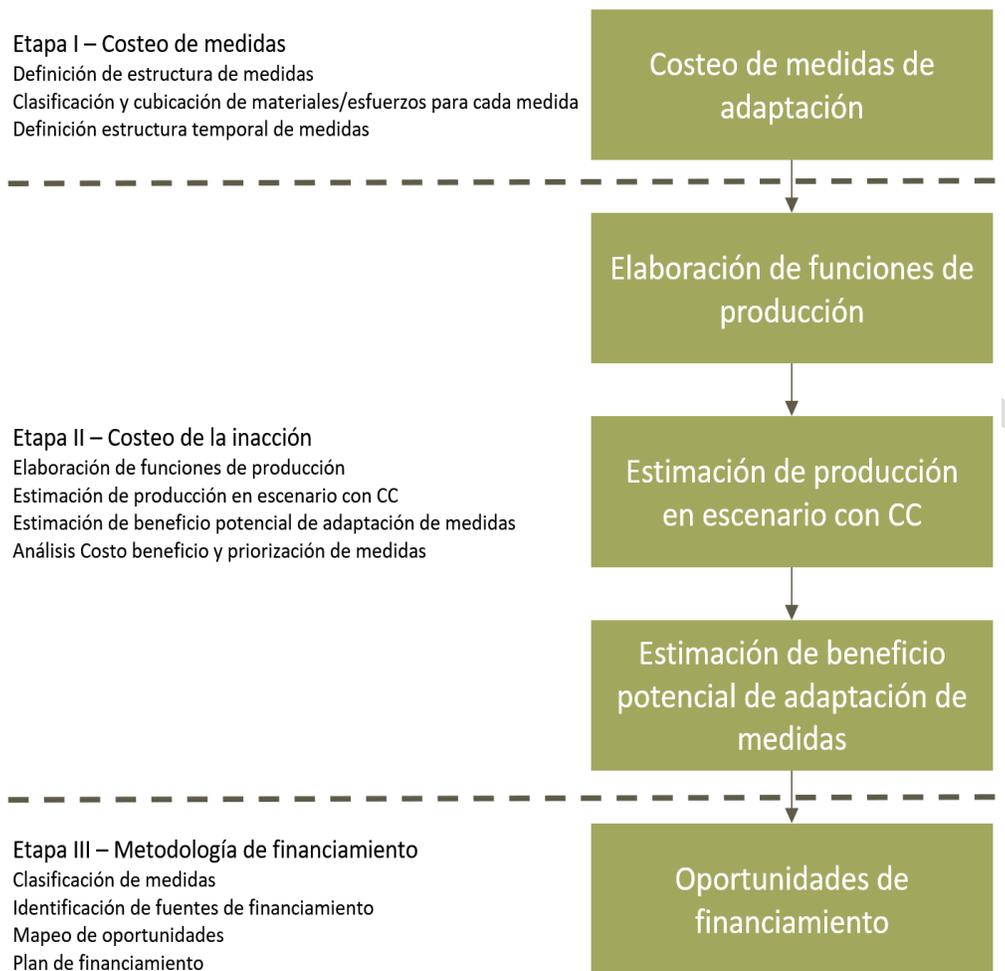
- Determinar una metodología de costeo de baja complejidad y determinar el costo asociado a las medidas de adaptación priorizadas y sus respectivas acciones, que permita modular tres niveles de esfuerzo para lograr un efecto de adaptación eficiente del sector SAP frente al cambio climático.
- Generar un modelo de baja complejidad que permita estimar el costo de la inacción frente al cambio climático de no aplicarse las medidas de adaptación priorizadas, con sus respectivas acciones, para el sector SAP, incluyendo una metodología, definición, supuestos y alcances acordes para este cálculo.
- Establecer una metodología y su implementación, para el desarrollo de una estrategia de financiamiento para aquellas medidas y acciones priorizadas a partir del proceso de costeo, que contemple fuentes nacionales e internacionales y que considere la participación del sector público y privado.
- Generar una metodología de baja complejidad para el costeo de medidas y acciones priorizadas y su estrategia financiera para la implementación, que sea replicable sin requerir instalación de capacidades altamente específicas, y transferir aquellos conocimientos a las unidades técnicas relevantes según sea requerido por la contraparte.

4.2 Resumen de la metodología de trabajo

A continuación, se presenta un diagrama resumen de la estructura de trabajo propuesta, esta considera 3 etapas principales de trabajo, a ser ejecutadas en orden secuencial. Cada una está asociada a uno de los hitos principales del trabajo: generar un costo de las medidas priorizadas, identificar el beneficio potencial de adaptación que estas medidas entregan y configurar un plan de financiamiento para estas medidas.



Figura 4-1. Diagrama resumen

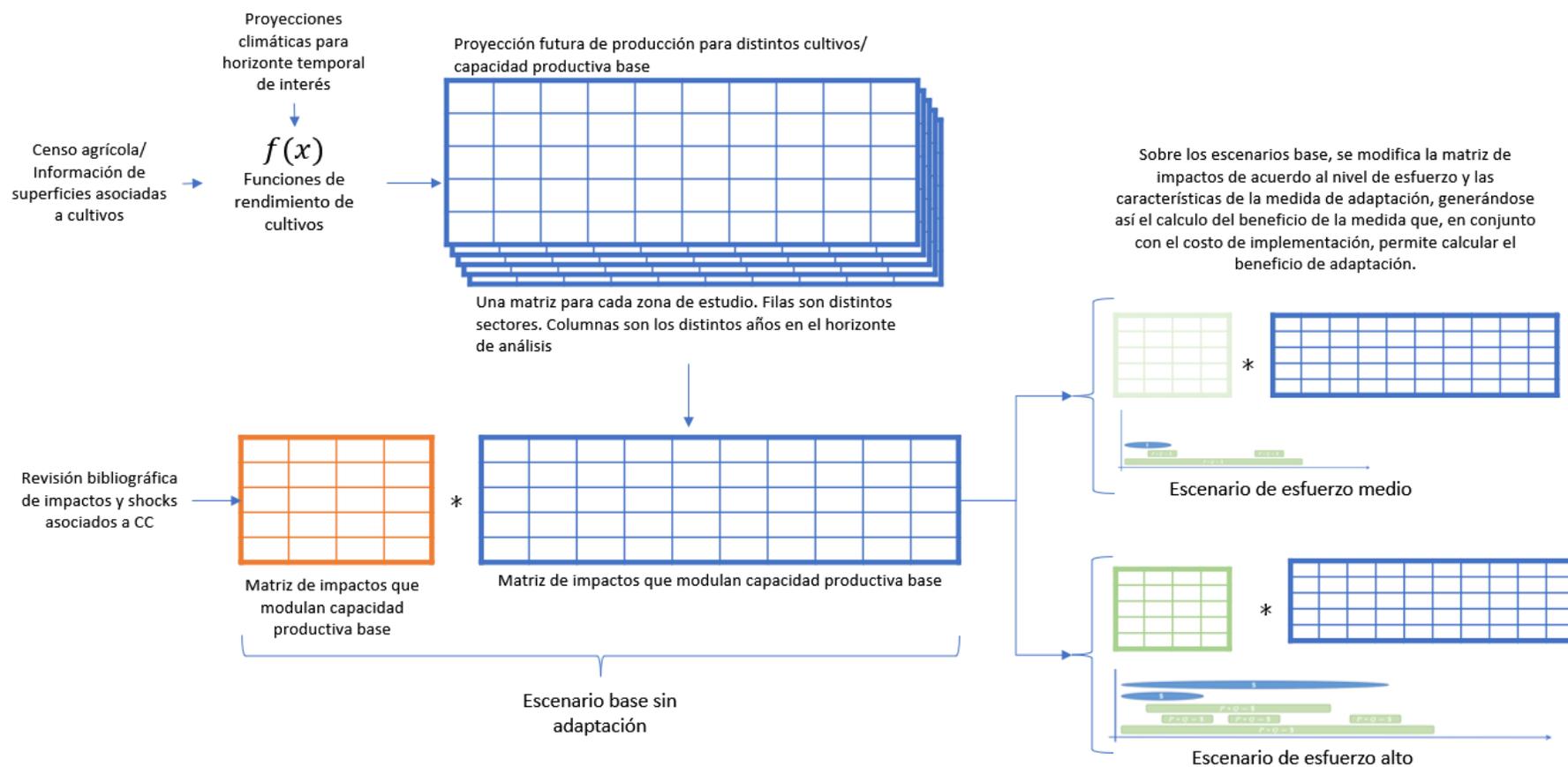


Fuente: Elaboración propia



4.2.1 Esquema de cálculo de beneficio de medidas de adaptación

Figura 4-2. Esquema resumen de cálculo de beneficios de medidas.



Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Fuentes de información necesarias

La construcción y poblamiento de los elementos que configuran el esquema de costeo requieren la recolección de información asociada a cada escenario climático seleccionado (y su traducción a las condiciones locales de análisis), cada sector productivo considerado y cada medida considerada, tanto para su costeo como para su análisis de impactos. El levantamiento de las mejores fuentes de información presentes a la fecha es parte del proceso de aplicación de la metodología por lo cual, como parte del producto final, se construirá y poblará una matriz de información necesaria y las fuentes de información consultadas para obtener dicha información.

4.3 Costeo de medidas

El objetivo del trabajo es agregar una dimensión económica al proceso de priorización de medidas de adaptación al cambio climático, desestimando aquellas cuya relación costo-beneficio no resulte suficientemente atractiva. Para estos efectos es necesario establecer un proceso de cuantificación de esfuerzos y costos sobre estas medidas, el cual se realizará de manera independiente para cada una de estas en base al set de acciones que las componen.

El insumo principal para iniciar el proceso corresponde a la priorización de medidas y sus correspondientes acciones, elaboradas en la instancia participativa de actualización del plan de adaptación del sector silvoagropecuario (SAP). Este documento detalla la estructura que organiza y configura las medidas incorporadas en el plan. Los principales elementos de nivel más general corresponden a las **Líneas Estratégicas de Adaptación** y las **Condiciones Habilitantes**. Una descripción de estos elementos se presenta a continuación:

- **Líneas Estratégicas de Adaptación:** corresponden al conjunto de medidas orientadas a intervenir sobre los impactos del cambio climático en el sector silvoagropecuario en Chile y está conformada por todas aquellas iniciativas tendientes a implementar nuevas técnicas/tecnologías o mejorar las existentes, para el manejo del recurso hídrico, infraestructura productiva, gestión del riesgo climático, el manejo agronómico y fomentar la sustentabilidad agroambiental.

- **Condiciones Habilitantes:** se refiere a todas las modificaciones y adecuaciones imprescindibles de realizar a nivel de instrumentos financieros, normativas legales y acciones administrativas, necesarias para implementar las medidas de adaptación determinadas., además de aquellas condiciones de género y multiculturalidad asociadas a una adaptación justa.

Las líneas estratégicas de adaptación engloban a su vez un set de medidas agrupadas en base a su afinidad temática o a la forma en las que abordan el objetivo de adaptación para el sector SAP. A su vez, estas medidas están configuradas por acciones, las cuales son las unidades constituyentes de estas medidas. Así, el plan de adaptación se construye sobre un lenguaje común que facilita su análisis de manera estructurada. La figura presentada a continuación entrega un esquema de la categorización de las medidas priorizadas a considerar.

Figura 4-3. Diagrama categorización de medidas.



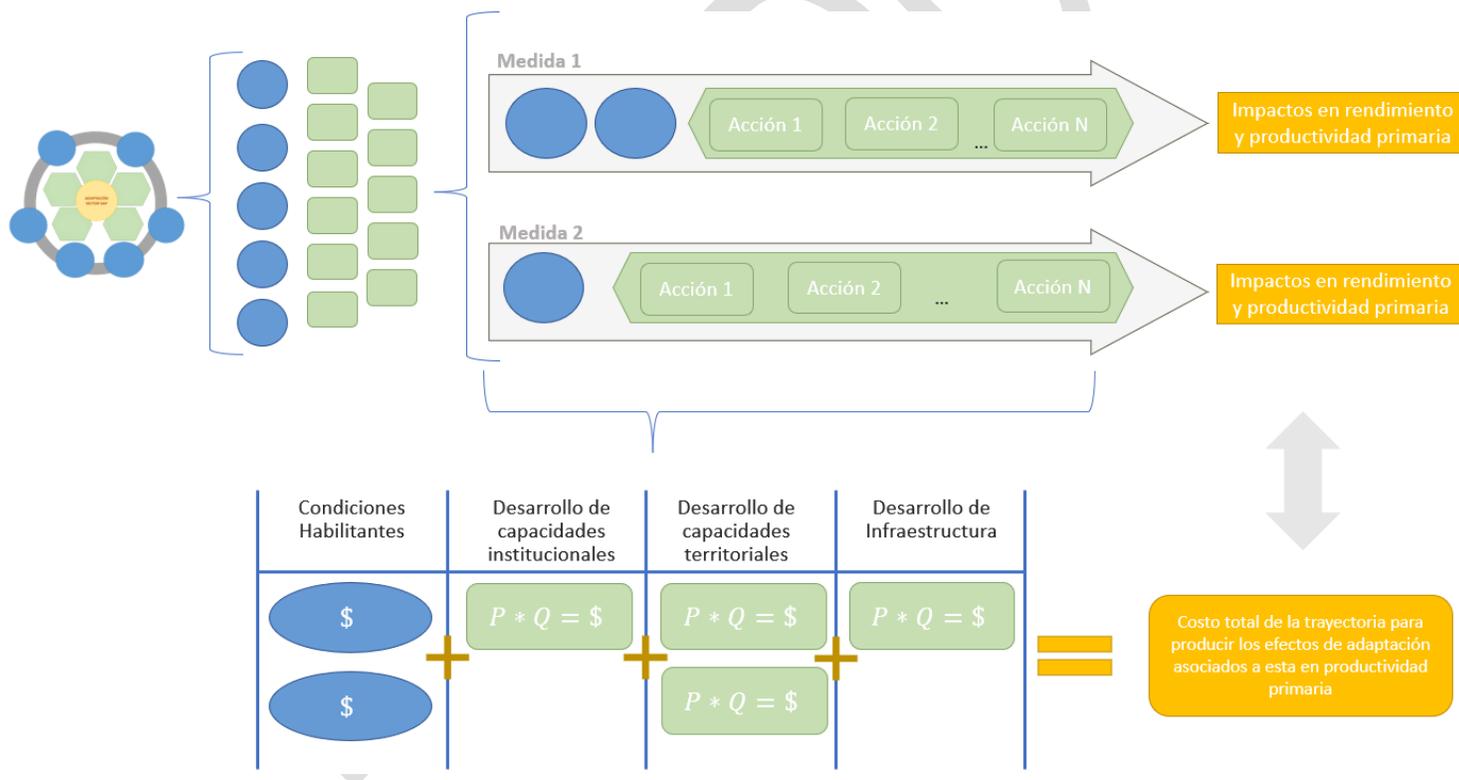
Fuente: MINAGRI

En primer lugar, se analizará la estructura de las medidas propuestas, identificando claramente los alcances y fronteras de análisis para el conjunto de acciones que componen estas medidas.

El objetivo será asegurar una definición robusta de las medidas entregadas en línea con los objetivos del estudio, al mismo tiempo que facilite la cuantificación de materiales y esfuerzos asociados a su implementación.

Posteriormente, las medidas serán descompuestas en sus acciones constituyentes, las cuales serán clasificadas en ámbitos de acción similares con el fin de homogeneizar supuestos y estructuras de costos en los posibles. Inicialmente, se considera una clasificación entre Condiciones Habilitantes, Desarrollo de capacidades institucionales, Desarrollo de capacidades territoriales, Desarrollo de Infraestructura.

Figura 4-4. Esquema resumen estructura de costeo.

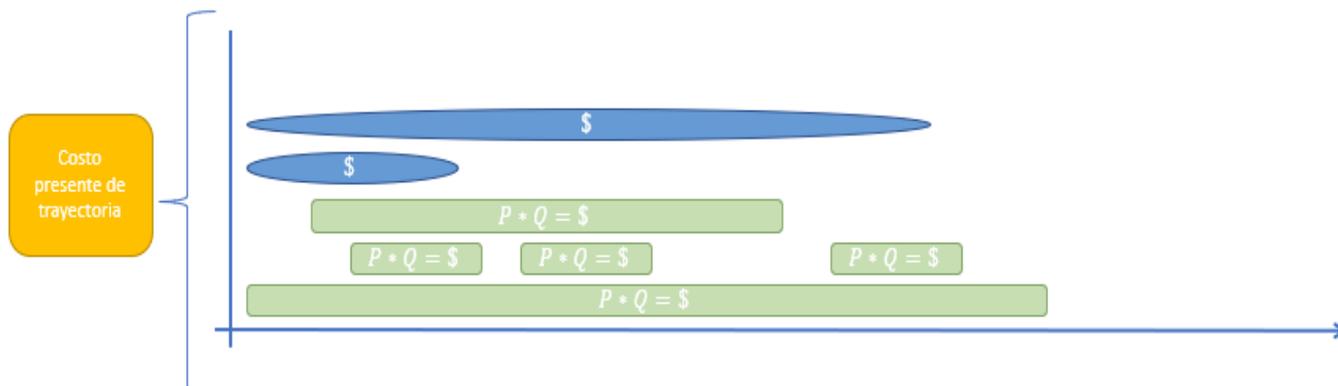


Fuente: Elaboración propia

Finalmente, las acciones con sus respectivas ubicaciones de materiales y/o esfuerzos es traducida a una estructura temporal con el fin de definir horizontes de acción e indicadores como valor presente neto del esfuerzo y tasa interna de retorno.

Figura 4-5. Esquema gráfico estructura temporal de medida.

Fuente: Elaboración propia



La elaboración del costeo de las medidas se apoyará en revisión de fuentes secundarias relevantes y entrevistas con expertos en caso de ser requerido. Se considera preliminarmente utilizar fuentes como los actuales Planes estratégicos de gestión hídrica elaborados para la DGA, otros estudios de costeo de adaptación, documentación de la ENCCRV o fichas de costos ODEPA, entre otras posibles fuentes a ser consultadas.

4.4 Costeo de la inacción – definiciones preliminares

Operativizar los objetivos antes planteados requiere establecer una serie de definiciones respecto a ciertos conceptos clave. Estos incluyen desde definir el costo de la inacción, seleccionar los escenarios futuros que se consideran, hasta encontrar los límites que se impondrán a la representación del sector SAP, entre otros. Esta sección aborda en primer lugar el listado de definiciones adoptadas para efectos de enmarcar el trabajo futuro.

4.4.1 Definición de inacción

Mientras que los costos de políticas de adaptación y acciones asociadas no presentan alta resistencia a ser definidos de manera certera, lo mismo no ocurre con la definición de inacción para la adaptación. Esto debido a que el cálculo de este costo requiere establecer una trayectoria socioeconómica alternativa que sirva de línea base o de escenario contrafactual para el cálculo, que no incorpore los efectos de la acción en estudio. Al respecto, no existe una alternativa inequívoca para definir la ausencia de dichos efectos, por cuanto la trayectoria a ser

definida depende de una serie de desarrollos en áreas como políticas públicas que no solo funcionan en un continuo sino también interactúan y son dependientes de los mismos fenómenos que se intenta aislar. La OECD (OECD, 2008) ofrece una serie de ejemplos a nivel de políticas ambientales para definir inacción como:

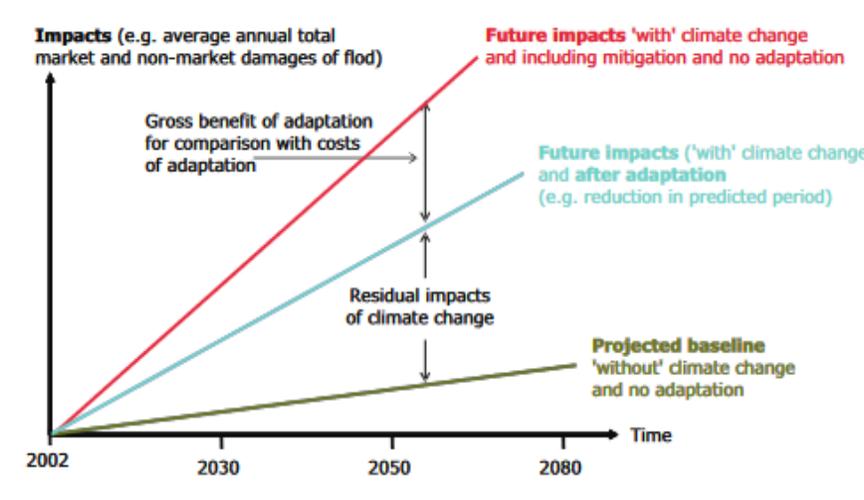
- Un escenario hipotético pesimista donde se asume la ausencia absoluta de cualquier política ambiental o intervención cualquiera;
- Un escenario tendencial donde los actuales niveles de esfuerzo en políticas públicas ambientales se mantienen constantes en el futuro;
- Un escenario optimista construido en base a un supuesto creíble de crecimiento en el nivel de esfuerzo de las políticas públicas en el futuro.

La Agencia Ambiental Europea (European Environment Agency, 2007) establece una serie de consideraciones respecto al cálculo del costo de la inacción para el caso específico de los impactos del cambio climático, destacando la elevada varianza en resultados que las distintas definiciones y supuestos factibles de elegir en esta etapa son capaces de generar. Un extremo presente en la literatura consiste en imaginar un escenario hipotético donde las condiciones simulan una ausencia no sólo de medidas de mitigación sino también de los impactos atribuibles al cambio climático, por ejemplo, expandiendo las condiciones actuales o históricas en el horizonte de evaluación. Si bien esta alternativa entrega una trayectoria fácil de construir sobre la cual realizar las comparaciones de distintas medidas de mitigación, esta no es en rigor una métrica que entregue un “costo de la inacción”, al no incorporar los efectos del cambio climático.

En este caso, y dados los objetivos de este estudio, se determina la necesidad de generar una metodología que permita estimar los costos de inacción bajo un escenario de cambio climático plausible, el cual se define como la línea base de la inacción, al mismo tiempo que permite estimar los beneficios de la adaptación para finalmente comparar ambas trayectorias. De esta forma, el costo de la inacción se define no como el impacto versus un escenario hipotético

carente de cambio climático, sino como el beneficio total disponible de ser capturado mediante las distintas opciones de adaptación que no son abordadas dentro del escenario (de inacción) evaluado.

Figura 4-6. Esquema gráfico, señalando el costo de la inacción como la distancia en trayectoria de inacción (roja) y trayectoria de adaptación (celestes)



Fuente: Adaptado de (European Environment Agency, 2007)

Formulando esto como una expresión más formal, una versión general tendría la forma:

$$\text{Costo total}_{cc} = \text{Costo mitigación} + \text{Costo adaptación} + \text{Costo residual}$$

Donde:

$$\text{Costo residual} = \text{Costo inacción} - \text{Beneficio mitigación} - \text{Beneficio adaptación}$$

Debido a que el estudio no considera dentro de sus alcances el análisis del impacto de la mitigación, estos pueden ser simplificados de la expresión anterior, es decir se asume un valor igual a cero para ellos. Con esto en mente y reordenando, podemos definir inacción como:

$$\text{Costo inacción} = \text{Costo total}_{cc} - \text{Costo adaptación} + \text{Beneficio adaptación}$$

Finalmente, cuando el análisis considera el potencial de influenciar (mediante mitigación) la trayectoria de cambio climático que está siendo considerada, se debe representar el diferencial entre la trayectoria de “máxima mitigación” (i.e. aquella con el mínimo nivel de cambio

climático considerado factible) y el escenario efectivamente considerado. En la expresión anterior este diferencial se representa mediante el término $Costo\ total_{cc}$.

No obstante, debido a que el análisis no considera variaciones a la trayectoria de cambio climático (i.e. el escenario base es en sí el escenario de “máxima mitigación”) este término puede igualmente simplificarse. Así, el costo de la inacción queda establecido como la diferencia entre la capacidad productiva sin incluir la medida de adaptación, con la capacidad productiva incluyendo la medida, pero restando el costo que implica tomar esta medida.

$$Costo\ inacción = Costo\ adaptación + Beneficio\ adaptación$$

4.4.2 Impactos en el sector SAP

La siguiente definición relevante refiere a aquellos alcances que deben ser incorporados en la definición de impactos del sector Silvoagropecuario. Es importante considerar el alcance con que se realizarán las estimaciones, debido a que la incorporación de los distintos encadenamientos tanto anteriores como posteriores de las actividades productivas propias del sector afectan el nivel de detalle y complejidad que un modelo puede requerir para describirlas. Los impactos a su vez pueden ser separados en aquellos directos (e.g. cambios en rendimientos o producción total) vs impactos indirectos (i.e. cómo estos impactos directos repercuten en otros aspectos de la economía, por ejemplo, mediante variaciones en precios de insumos o competencia por estos insumos con otros sectores).

En atención al objetivo de construir una metodología de baja complejidad para priorizar medidas según su beneficio potencial, se opta por establecer una definición lo más acotada posible de los impactos. De este modo, se considerarán únicamente los impactos en la productividad primaria del sector SAP producto del cambio climático, sin atender a encadenamientos, procesos posteriores o impactos indirectos.

4.4.3 Sub-sectores primarios considerados

Como la revisión bibliográfica permite observar, existe alta variabilidad en el nivel de detalle y agrupación de los distintos subsectores pertenecientes a la producción primaria que cada metodología y modelo considera, y por lo mismo la pregunta sobre la agrupación de éstos no

es trivial. Existen, sin embargo, catastros de la actividad económica nacional como el realizado por (Foster & Valdés, 2013) que generan una sistematización de las distintas actividades y productos del sector SAP o el censo agrícola en su última versión disponible, los cuales serán utilizados para realizar estas agrupaciones.

Utilizando estos trabajos como referencia, se optará por agrupar los subsectores y productos del sector productivo primario silvoagropecuario. La agrupación se realizará en base a las categorías presentes en la información primaria a utilizarse, considerándose censo agrícola como principal fuente de información. Los sub-sectores del SAP que se usarán en este análisis son entonces aquellos que para cada zona a analizarse presenten el mayor peso relativo y que en su conjunto permitan generar una representación lo suficientemente robusta para realizar el análisis económico de las medidas priorizadas. No obstante, a modo de ejemplo, se entregan las siguientes categorías que podrán ser consideradas en esta misma forma o en la agrupación que la información disponible permita:

i) Ganadero: incluye producción de carne de ovinos, bovinos y caprinos. Este sector tiene estrecha relación con la producción de cereales forrajeros. Los impactos del cambio climático también pueden representarse como shocks a la producción a través de plagas y enfermedades, escasez hídrica, cambios en el ciclo de vida, entre otros.

ii) Lechero: se refiere a la producción lechera de ovinos, bovinos y caprinos. Este sector tiene estrecha relación con la producción de cereales forrajeros. Los impactos del cambio climático también pueden representarse como shocks a la producción a través de plagas y enfermedades, escasez hídrica, cambios en el ciclo de vida, entre otros.

iii) Silvícola: producción de madera o celulosa de plantaciones forestales como pino y eucaliptus.

iv) Cereales y leguminosas: incluye el cultivo de trigo, avena, maíz, arroz, lenteja, garbanzos, entre otros.

iv) Hortalizas de parte subterránea comestible: hortalizas de bulbo o raíz comestible, como papa, cebolla, ajo, camote, zanahoria, entre otros.

v) Hortalizas de parte aérea comestible: hortalizas en que se consume la fruta, hoja, tallo o flor, como la lechuga, albahaca, coliflor, tomate, apio, entre otros.

vi) Frutales: incluye vides, carozos, cítricos, pomáceas, entre otros.

Las agrupaciones que se utilizarán serán definidas en atención a la capacidad de la metodología de representar los impactos del cambio climático sobre los rendimientos de los productos y la viabilidad de obtener la información necesaria para caracterizar la actividad productiva. No obstante, se considera a priori que se incorporarán los sectores de cultivos, producción animal y forestal, agrupados en base a la similitud de sus características productivas y comportamiento ante factores ambientales, además de su relevancia específica en cada macrozona en estudio. La producción primaria ligada a los ecosistemas marinos y acuáticos (pesca y acuicultura) no se incluirá a excepción de que existan medidas priorizadas ligadas directamente con ésta.

4.4.4 Escenario de cambio climático

El trabajo de costeo e impactos se realizará sobre una trayectoria de emisiones que será traducida a una variación en condiciones locales de indicadores, tales como la temperatura media o la frecuencia e intensidad de precipitación, así como probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos. Se considerará el escenario representativo RCP 8.5 elaborado en el marco del CMIP5. La información relativa a las variaciones climáticas asociados a este escenario para la geografía chilena se obtendrá de fuentes secundarias como la plataforma de simulaciones climáticas del CR2 y traducidas a indicadores locales relevantes.

4.5 Costeo de la inacción – metodología de cálculo

La adopción metodológica para el trabajo se ha realizado en base a los objetivos de este, las alternativas presentes en la literatura, la posibilidad de describir los fenómenos y mecanismos de impacto del cambio climático sobre el sector SAP y de reflejar los efectos de las medidas de adaptación que sean priorizadas.

4.5.1 Descripción del rendimiento ambiental de los subsectores

La metodología seleccionada tiene como pieza central la construcción de un set de curvas de producción para los distintos productos o agrupaciones de productos. La construcción de estas

curvas se realizará mediante información secundaria como literatura o catastros existentes de rendimientos.

En términos formales, se considera que la producción de un cultivo (ton) depende de la superficie cultivada y del rendimiento de un cultivo (i.e. ton/ha), que a su vez puede ser descrito como una función de los insumos y condiciones ambientales en que es cultivado.

$$P = R(\text{condiciones ambientales, insumos}) * S$$

Donde P es la producción, R corresponde al rendimiento del cultivo en cuestión y S la superficie cultivada. En particular, se atenderá a la influencia de tres fenómenos principales en la producción de cada cultivo:

- El impacto de la distribución de temperatura, representado principalmente por los parámetros temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima de cada sector considerado.
- El cambio en las precipitaciones impactará la superficie cultivada para cultivos irrigados y el rendimiento para cultivos de secano.
- El impacto de shocks ambientales u otros fenómenos de ocurrencia aleatoria y alto impacto, como shocks de calor o incendios, entre otros.
- Efectos de medidas de adaptación que por sus características no puedan ser incorporados en los otros fenómenos descritos.

Se asume que el impacto y la función de distribución de estos tres factores son independientes entre sí. De este modo, la función de producción puede ser expresada como el producto de la función de impacto de cada fenómeno considerado. De este modo, la producción de cada subcategoría de cultivo k puede ser descrito mediante la expresión:

$$\begin{aligned} \text{Producción}_k &= R_k(ETc \{kc, Ro, T_{mean}, T_{max}, T_{min}\}, ks, iR\{prob, mag\}) * S_k \\ &* iP(prob, mag) * A \end{aligned}$$

Donde,

R_k	$\in R^+$	Es el Rendimiento del cultivo "k"
ETc	$\in R^+$	Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar
kc	$\in R^+$	Coefficiente de cultivo
$\{T_{mean}, T_{max}, T_{min}\}$	$\in R$	Son temperaturas media, máxima y mínima respectivamente. Estos valores serán extraídos de la literatura relevante tanto para las condiciones históricas como del escenario futuro de cambio climático considerado
ks	$\in [0,1]$	Coefficiente de estrés hídrico. Factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo. Esta se verá modificada sólo para cultivos de secano.
R_o	$\in R^+$	Radiación extraterrestre propia de la macrozona.
S_k	$\in R$	Es la superficie de cada subcategoría "k" de cultivo para cada macroregión. En condiciones futuras, la superficie cultivada se verá afectada sólo en cultivos irrigados, considerando el supuesto que, a menor disponibilidad hídrica, menor superficie cultivada y viceversa.
$iP()$	$\in [0,1]$	Esta es una función que agrupa los impactos de eventos extremos sobre la productividad del cultivo, representando mermas producto de eventos extremos sobre la producción total de cada subsector, como la ocurrencia de incendios, inundaciones, etc. Estos están influenciados por una magnitud y una probabilidad de ocurrencia.
$iR()$	$\in [0,1]$	Esta es una función que agrupa los impactos de eventos extremos sobre el rendimiento del cultivo, representando mermas producto de eventos extremos sobre el rendimiento total de cada subsector, como el aumento de plagas y enfermedades. Estos están influenciados por una magnitud y una probabilidad de ocurrencia.
A		Es una variable auxiliar de adaptación que busca representar el impacto de alguna medida de adaptación sobre la producción que dadas sus características no sea posible representado en los otros parámetros.

De esta forma, se construirán expresiones específicas para cada cultivo que sean capaces de representar la producción esperada de estos en distintos escenarios de cambio climático y condiciones ambientales específicas para cada macrozona analizada.

4.5.2 Caracterización de las áreas de estudio y estimación de producción en escenario con CC

Una vez construidas las curvas de producción de cada cultivo, se procederá a establecer las unidades mínimas de análisis que serán utilizadas en el estudio. Estas corresponden a la

extensión geográfica de cada macrozona, para las cuales se establecerán las condiciones presentes y futuras de los distintos descriptores climáticos relevantes. Estos serán obtenidos de fuentes secundarias como la plataforma de simulaciones climáticas del CR2.

Adicionalmente, se establecerán datos relevantes para el análisis como superficie irrigada total, volumen de agua disponible para riego, precipitación media, superficie plantada para cada cultivo considerado, así como superficie total disponible para cada macrorregión. Estos valores serán extraídos de catastros como el censo agrícola u otras fuentes secundarias relevantes. De esta forma, se poblará una representación de cada macrozona con la producción total de cada actividad considerada, según lo descrito en el acápite anterior.

Este cálculo se realizará considerando 2 condiciones de producción, Riego y Secano, trabajándose en la práctica la producción de un mismo subsector bajo cada condición de producción como un subsector independiente y considerándose a su vez condiciones homogéneas de producción bajo cada régimen para cada cultivo. El ingreso total para cada macrozona corresponde finalmente a la sumatoria de la producción de las distintas actividades presentes en dicha área de estudio multiplicada por el precio del cultivo. Esto queda definido por la expresión:

$$\sum_{k=1}^N (Producción_k * \$_k)$$

Donde:

$\$_i$ es el precio por unidad producida de la subcategoría del cultivo k

De esta forma, el escenario de producción cambio climático no mitigado queda dado por la valorización de la expresión anterior en el escenario seleccionado (que como se mencionó antes corresponde a la trayectoria representativa RCP 8.5 del CMIP5) en un escenario de misma distribución de cultivos y condiciones de infraestructura a las actuales, sin adaptaciones en las curvas de producción o parámetros de entrada.

4.5.3 Cuantificación del beneficio y el costo de la inacción

4.5.3.1 Caracterización del impacto de cada medida

Establecido el costeo de las medidas, se procederá a cuantificar el impacto o beneficio de estas. Esto se realizará mediante una revisión bibliográfica de los beneficios potenciales de estas, a modo de establecer su influencia sobre el rendimiento de cada cultivo o condición de producción y de esta manera traducir sus impactos ya fuese en las curvas de producción mismas, los parámetros que alimentan estas funciones para cada área de análisis, o la descripción misma de las condiciones de cada macrorregión (e.g. agua total disponible, superficie total disponible).

Este nivel de beneficio podrá ser modulado según un nivel de esfuerzo, a modo de permitir identificar niveles mínimos de implementación para lograr una adaptación efectiva. Esto permitirá construir una cuantificación del impacto de la medida para cada macrozona.

4.5.3.2 Metodología de cálculo del beneficio de cada medida

Establecidas las funciones de producción, los procedimientos de costeo y caracterización de beneficios para las medidas y las condiciones del sector SAP para cada región, se procede a llevar a cabo una cuantificación del beneficio del portafolio de medidas priorizadas.

Esto se realiza tomando el escenario descrito en acápite 5.5.2. y contrastando con el escenario de situación adaptada (i.e. funciones de producción y condiciones actualizadas) y se calcula la diferencia en el ingreso total de ambos escenarios que se estiman con el cambio climático. La inacción queda descrita de esta forma como la diferencia de productividad entre estos dos escenarios. Este proceso queda expresado de la siguiente forma:

$$\text{Costo inacción} = \text{Ingreso bajo adaptación} - \text{Ingreso sin adaptación} - \text{costo medida}$$

O, lo que es equivalente:

$$\text{Costo inacción} = \sum_{k=1}^N (\text{Producción}'_k * \$_k) - \sum_{k=1}^N (\text{Producción}_k * \$_k) - \text{costo medida}$$

Donde las funciones con apóstrofe son las versiones actualizadas de acuerdo a la medida de adaptación empleada. Los cambios en áreas de cultivo y superficie regada producto de

variaciones ambientales se ajustarán en base a un criterio de maximización del valor producido.

4.6 Plan de implementación

Finalmente, se entrega una propuesta de plan de implementación asociado a esta propuesta metodológica, con el fin de ejemplificar el proceso práctico de aplicación de la metodología.

Tabla 4-1. Plan de implementación

Cronograma	Mes	
	1	2
Actividad		
Recepción de medidas	■	
Recopilación y análisis de información de zonas de estudio, incluyendo proyección climática	■	
Priorización de sectores productivos relevantes para medida y área de estudio	■	
Elaboración de funciones de producción		■
Elaboración o actualización de escenario base de producción		■
Recopilación de información de impactos climáticos sobre sectores relevantes		■
Análisis y determinación de influencia de la medida sobre impactos climáticos		■
Determinación de niveles de esfuerzo y cubicación de costos de medida		■
Análisis costo beneficio de medida y niveles de esfuerzo		■

Fuente: Elaboración propia

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo realizado ha generado un mapeo de alternativas para el objetivo de costeo, seleccionado una alternativa en base a sus méritos por sobre otras opciones y su alineamiento con los objetivos declarados para el estudio. En general, la alternativa propuesta destaca por ser de relativa baja complejidad, pero con la capacidad de representar los principales aspectos de interés (producción SAP, su proyección futura bajo cambio climático y el impacto de medidas de adaptación). Presenta a su vez la ventaja de ser adaptable tanto temporal como geográficamente, se funda en principios sencillos y no presenta barreras para su aplicación, como por ejemplo la adquisición de elementos computacionales. La información que se utilice para sus cálculos o las unidades geográficas que se contemplen pueden ser redefinidas a medida que estén disponibles otras fuentes de información o cambien los objetivos de estudio.

Como recomendación principal, se destaca que la metodología de cálculo se beneficia de una robusta descripción de las medidas de adaptación a considerar. De esta forma, se recomienda que las medidas vengan con el mayor nivel de detalle posible con el fin de minimizar el cuerpo de supuestos que se deban tomar para realizar el costeo. Por ejemplo, se recomienda detallar o al menos describir la escala geográfica y temporal de aplicación de la medida, y los actores y sectores asociados a esta, categoría de adaptación (adaptativa o transformativa), y, en general, su relación y situación dentro de una trayectoria general de adaptación en la que se enmarque.

6 BIBLIOGRAFÍA

Gaffney, O., & Steffen, W. (2017). The Anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, 4(1), 53–61. <https://doi.org/10.1177/2053019616688022>

Georgia State University. (n.d.). *Lab 6: Global Surface Temperature* |. Retrieved May 10, 2022, from <https://sites.gsu.edu/geog1112/global-surface-temperature/>

IPCC. (2022). *IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf*. https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf

Johnsen, S. J., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Steffensen, J. P., Clausen, H. B., Miller, H., Masson-Delmotte, V., Sveinbjörnsdóttir, A. E., & White, J. (2001). Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP: OXYGEN ISOTOPE AND PALEOTEMPERATURE RECORDS FROM SIX GREENLAND ICE-CORES. *Journal of Quaternary Science*, 16(4), 299–307. <https://doi.org/10.1002/jqs.622>

Maher, K., & Chamberlain, C. P. (2014). Hydrologic Regulation of Chemical Weathering and the Geologic Carbon Cycle. *Science*, 343(6178), 1502–1504. <https://doi.org/10.1126/science.1250770>

Richerson, P. J., Boyd, R., & Bettinger, R. L. (2001). Was Agriculture Impossible during the Pleistocene but Mandatory during the Holocene? A Climate Change Hypothesis. *American Antiquity*, 66(3), 387–411. <https://doi.org/10.2307/2694241>

Riebeek, H. (2011, June 16). *The Carbon Cycle* [Text.Article]. The Carbon Cycle; NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>

Schmidt, G. A., Ruedy, R. A., Miller, R. L., & Lacis, A. A. (2010). Attribution of the present-day total greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research*, 115(D20), D20106. <https://doi.org/10.1029/2010JD014287>

Smil, V. (2004). World History and Energy. In *Encyclopedia of Energy* (pp. 549–561). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00025-5>

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., Donges, J. F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R., & Schellnhuber, H. J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252–8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>

Uemura, R., Motoyama, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J., Kawamura, K., Goto-Azuma, K., Fujita, S., Kuramoto, T., Hirabayashi, M., Miyake, T., Ohno, H., Fujita, K., Abe-Ouchi, A., Iizuka, Y., Horikawa, S., Igarashi, M., Suzuki, K., Suzuki, T., & Fujii, Y. (2018). Asynchrony between Antarctic

temperature and CO₂ associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications*, 9(1), 961. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03328-3>

Ackerman, F., Stanton, E. A., Hope, C., Alberth, S., Fisher, J., Biewald, B., Perera, E. M., & Lashof, D. (2008). *What We'll Pay if Global Warming Continues Unchecked*. 42.

Bonen, A., Semmler, W., & Klasen, S. (2014). *Economic Damages from Climate Change: A Review of Modeling Approaches*.

http://www.economicpolicyresearch.org/images/docs/research/climate_change/IACC_DamageFunctions_FINAL_1.pdf

Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577), 235–239. <https://doi.org/10.1038/nature15725>

Carleton, T. A., & Hsiang, S. M. (2016). Social and economic impacts of climate. *Science*, 353(6304), aad9837. <https://doi.org/10.1126/science.aad9837>

Delloite. (2021). *The turning point: A new economic climate in the United States*. 52.

European Environment Agency. (2007). *Climate change: The cost of inaction and the cost of adaptation*. Publications Office.

https://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_13/download

Foster, W., & Valdés, A. (2013). *¿Cuál es el tamaño económico del sector silvoagropecuario en Chile?* 68.

Hutchinson, S., & Gomes, C. (2021). An assessment of the economic and social impacts of climate change on the agriculture sector in the Caribbean—Economic Commission for Latin America and the Caribbean—ECLAC. In H. Canton, *The Europa Directory of International Organizations 2021* (23rd ed., pp. 142–144). Routledge.

<https://doi.org/10.4324/9781003179900-19>

IIASA. (2015). *SSP_Model_Documentation.pdf*.

https://tntcat.iiasa.ac.at/SspWorkDb/download/iam_scenario_doc/SSP_Model_Documentation.pdf

IPCC. (2022). *IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf*.

https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf

OECD. (2008). *Costs of Inaction on Environmental—Policy Challenges: Summary Report*.

<https://www.oecd.org/env/40501169.pdf>

OECD. (2013). *Flyer ENV-Linkages model*. <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/flyer%20ENV-Linkages%20model%20-%20version%2025%20Sept%202013.pdf>

OECD. (2015). *The Economic Consequences of Climate Change*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264235410-en>

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

Zhao, X., Calvin, K. V., & Wise, M. A. (2020). THE CRITICAL ROLE OF CONVERSION COST AND COMPARATIVE ADVANTAGE IN MODELING AGRICULTURAL LAND USE CHANGE. *Climate Change Economics*, 11(01), 2050004. <https://doi.org/10.1142/S2010007820500049>

BORRADO