



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS COMPROMISOS CLIMÁTICOS DE CHILE EN EL ÁMBITO DEL USO DE SUELO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE AGUSTÍN HUALA TOMÁS

PROFESOR GUÍA:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
KATHERINE LIZAMA ALLENDE
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: FELIPE AGUSTÍN HUALA TOMÁS
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS COMPROMISOS CLIMÁTICOS DE CHILE EN EL ÁMBITO DEL USO DE SUELO

El calentamiento global es un problema multidimensional causado principalmente por la acumulación constante de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, es importante encontrar respuestas y herramientas para mejorar la toma de decisiones en la mitigación y adaptación al cambio climático. En este sentido, los compromisos establecidos por Chile en su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) indican que debemos avanzar tanto en la reducción de emisiones como en el aumento y protección de los sumideros de carbono. Esto último, se da sólo en el sector de “Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura” (UTCUTS).

Es por esto que el objetivo de esta memoria de título, es el de modelar el balance de gases de efecto invernadero del sector UTCUTS y analizar los compromisos climáticos de Chile en el ámbito de uso de suelo. Como resultado, se cuantifican los cambios de superficie que han ocurrido y su repercusión en las capturas de CO_2 . En particular, se cuantifica una tendencia al aumento de las superficies con plantaciones forestales y la respectiva tendencia a la disminución de bosques nativos. Ambos son los usos de suelo que tienen mayor capacidad para retener carbono. Por otro lado, se observa un aumento en el uso de pastizales, un aumento de superficie por asentamientos y una disminución en cultivos. A partir lo anterior, se definió un escenario base para cada región como “business as usual” (BAU) que sigue las tendencias actuales y se realizó un análisis de sensibilidad a las tasas de cambios de uso de suelo, en donde, se obtuvo que las capturas del sector UTCUTS se proyectan entre $-60.000 [ktCO_2eq]$ y $-70.000 [ktCO_2eq]$. Estas series históricas y proyecciones de usos de suelo sirven como insumo para modelos de calidad y cantidad de agua a nivel regional y de cuenca, además las proyecciones del balance de carbono permiten evaluar los impactos asociados, los compromisos y mejorar la toma de decisiones.

*El mundo no será destruido por quienes hacen el mal,
sino por quienes los observan **sin hacer nada**.*

Albert Einstein

Tabla de Contenido

1. Introducción y motivación	1
1.1. Objetivo general	5
1.2. Objetivos específicos	5
2. Antecedentes	6
2.1. Contribución Nacionalmente Determinada (NDC)	6
2.2. Trayectoria de concentración representativa (RCP)	8
2.3. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)	11
2.4. Marco teórico sobre el modelo de inventario de GEI del sector UTCUTS	14
2.5. Usos de suelo actuales en Chile	17
2.6. Cambio y uso de suelo histórico nacional	25
2.7. Impactos por cambios en el uso del suelo	25
2.8. Emisiones por incendios y consumo de leña y trozas	26
2.9. Series de usos de suelo en modelos de hidrología y calidad del agua	28
3. Metodología	30
3.1. Estimación MCUS regionales	30
3.2. Proyección balance de GEI en el sector UTCUTS	33
4. Resultados	44
4.1. Uso de suelo regional y nacional	44
4.2. Balance de carbono sector UTCUTS	51
4.3. Proyecciones sector UTCUTS	57
4.4. Análisis crítico de las proyecciones y compromisos de Chile	59
5. Conclusiones	62
Bibliografía	64
Anexos	70
A. Usos de suelo regionales	70

B. Anexos digitales	72
-------------------------------	----

Índice de Tablas

2.1.	Superficie ocupada en cada región por plantaciones forestales. Todos los valores están en hectáreas [ha]. Fuente de datos: CONAF, 2021	20
2.2.	Superficie ocupada en cada región por bosques nativos. Todos los valores están en hectáreas [ha]. Fuente de datos: CONAF, 2021	20
2.3.	Matriz de cambio y uso de suelo nacional entre el año 2011 y 2012 (CONAF, 2022).	25
3.1.	Fracción de carbono según tipo de tierra forestal. Fuente: MMA, 2021	36
3.2.	Se muestra el incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica de las plantaciones forestales. Los valores están en [m ³ /ha/año]. Fuente: MMA, 2021	37
3.3.	Se muestra el incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica en los Bosques Nativos. Los valores están en [m ³ /ha/año]. Fuente: MMA, 2021.	37
3.4.	Densidad básica según especie. Fuente: MMA, 2021.	37
3.5.	Factor R según especie. 1 El valor de “Otras especies” corresponde al promedio de <i>P. radiata</i> , Eucaliptus y <i>P. menziesii</i> . Fuente: MMA, 2021	38
3.6.	Edad de rotación según especie. Fuente: MMA, 2021.	39
3.7.	Biomasa acumulada antes de la conversión por tipo de uso de suelo. Fuente: MMA, 2021	39
3.8.	Existencia promedio de volumen de Bosques Nativos por unidad de superficie. *El valor de Ñuble fue calculado como el promedio de Maule y Biobío Fuente: MMA, 2021)	40
3.9.	Fracción de biomasa pérdida por perturbaciones según tipo de tierra forestal. Fuente: MMA, 2021. * Valor proporcionado por COR-MA para los incendios de ese año (MMA, 2021).	40
3.10.	Carbono total por madera muerta según especie. *Sin información, se toma el valor promedio. (INFOR,2020).	42
3.11.	Carbono retenido en hojarasca según la región (IPCC, 2006).	42

4.1.	Errores finales promedio para cada región en el proceso de optimización para la obtención de las matrices de cambio y uso de suelo regionales.	45
4.2.	Tendencias según el test de Mann-Kendall. La flecha hacia arriba, ↑, señala una tendencia al crecimiento. La flecha hacia abajo, ↓, una tendencia al decrecimiento. Las letras representan si el cambio es significativo (S) o no es significativo (N).	47
4.3.	Variación promedio de superficie en [ha/año] para cada tipo de uso de suelo en cada región durante el periodo 1990 - 2018.	48
4.4.	Tasas de falsos positivos y falsos negativos de la matriz de confusión que compara las clasificaciones entre capturas y emisión de ambos modelos.	56
4.5.	Estadísticas sobre el balance asociado a la serie histórica (1990 - 2018) y proyecciones (2019 - 2068).	58
4.6.	Resultados test de Mann-Kendall para el análisis de sensibilidad. Se realiza el test a la serie histórica de forma independiente, y a los casos considerando y no considerando la serie histórica.	59

Índice de Ilustraciones

1.1.	Balance de GEI (kt $CO_2 eq$) por sector en Chile, serie 1990-2018. Tomado del Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2020).	2
1.2.	Emisiones y capturas de GEI (kt CO_2eq) en el sector UTCUTS por categoría, serie 1990-2018. Tomado de: Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2020).	3
1.3.	Tierras forestales: emisiones y capturas de GEI (kt CO_2eq) por depósito de carbono, serie 1990-2018. Tomado de: Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2020).	4
2.1.	Trayectorias de forzante radiativa en función del tiempo. Se muestran las trayectorias de los escenarios RCP 8.5, RCP 6, RCP, 4.5 y RCP 2.6. Tomado de: IPCC, 2014	8
2.2.	Cambio en la temperatura media global respecto al promedio de temperatura del periodo preindustrial (1850 - 1900) en función de las acumulaciones de emisiones antropogénicas de CO_2 desde 1850. Tomado de: AR6 Synthesis Report (IPCC, 2021).	10
2.3.	Emisiones globales en gigatoneladas de CO_2 equivalente por año proyectadas para cada RCP con su respectiva variabilidad. Tomado de: AR5 Synthesis Report (IPCC, 2014).	11
2.4.	Variación de la temperatura en relación con la temperatura media del período 1850-1900 en función del tiempo, y sus proyecciones para diferentes escenarios SSP. La nomenclatura indica también el RCP asociado al escenario; por ejemplo, SSP1-2.6 se refiere al escenario SSP1 con RCP 2.6 (IPCC, 2021).	12
2.5.	Emisiones globales proyectadas para escenarios SSP y sus rangos de variabilidad, en conjunto con las proyecciones RCP (Riahi et al., 2016).	13
2.6.	Cambios en el uso del suelo en bosques, tierras de cultivo, pastizales y otros tipos de tierras naturales para los marcadores de SSP (Riahi et al., 2016).	13

2.7.	Comparativa de costos para el cruce entre escenarios SSP y RCP. A la izquierda se muestran los costos de mitigación y a la derecha los costos de adaptación (Van Vuuren, 2014).	14
2.8.	Diagrama del ciclo de carbono generalizado para ecosistemas terrestres del sector UTCUTS. Se muestran los depósitos que participan en el ciclo y sus transferencias. Tomado del Volumen 4 de las Directrices para inventarios de GEI del IPCC (IPCC, 2006).	16
2.9.	Serie de tiempo de las capturas totales nacionales de carbono por especie de plantaciones forestales en [kt CO_2 eq] según el Ministerio de medio ambiente.	21
2.10.	Serie de tiempo de las capturas totales nacionales de carbono por especie de bosques nativos en [kt CO_2 eq] según el Ministerio de medio ambiente.	22
2.11.	Uso de suelo porcentual para cada una de las regiones de Chile. Los nombres de las regiones se encuentran abreviados.	23
2.12.	Mapas que muestran la detección de Plantaciones Forestales y Bosques Nativos actuales para diferentes regiones de Chile. Fuente: INFOR, 2023	24
2.13.	Serie de tiempo de la superficie anual incendiada en Chile. Fuente de datos: CONAF, 2021	27
2.14.	Serie de consumo nacional de leña y trozas en [m^3]. Fuente de datos: MMA, 2020.	28
3.1.	Ciclo de carbono considerado en el modelo desarrollado.	34
4.1.	Superficie total que se tiene por cada tipo de uso de suelo en diferentes regiones de Chile. Se clasifica en Bosques Nativos, Plantaciones Forestales, Asentamientos, Tierras de Cultivo, Pastizales, Humedales y Otras Tierras.	46
4.2.	Superficie total que se tiene por especie en diferentes regiones de Chile.	50
4.3.	Usos de suelo totales nacionales. La línea negra divide la serie histórica de las proyecciones.	51
4.4.	Gráfico de dispersión entre el modelo y el Ministerio de medio ambiente para los resultados de las subcategorías del inventario.	52
4.5.	Comparación de los resultados del balance total de carbono para el sector UTCUTS entre el modelo y el Ministerio de Medio Ambiente.	54
4.6.	Matriz de confusión que muestra si los signos de los resultados de cada subcategoría del inventario estimado por el modelo y el Ministerio de Medio Ambiente coinciden o no.	56

4.7.	Proyecciones del balance de GEI del sector UTCUTS. Se realiza un análisis de sensibilidad respecto a las tendencias que determinan al caso base y se muestran las curvas para una sensibilidad del 50% y del 150%.	57
A.1.	Superficie total que se tiene por cada tipo de uso de suelo en otras regiones de la zona centro y sur de Chile.	70
A.2.	Superficie total que se tiene por cada tipo de uso de suelo en otras regiones de la zona centro y norte de Chile.	71

Capítulo 1

Introducción y motivación

La humanidad enfrenta una crisis debido al calentamiento global y al cambio climático; lo que ha sido provocado por la acumulación ininterrumpida de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2021). A causa de lo anterior, es que a nivel internacional, se han establecido acuerdos para abordar este suceso que cada vez se torna más complejo. Chile, en particular, ha firmado la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático” (1992), el “Protocolo de Kioto” (1998) y, más recientemente, el “Acuerdo de París” (2015).

El aporte de carbono a la acumulación atmosférica se evalúa mediante un balance de GEI, siguiendo la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Dicho balance consiste en calcular la diferencia entre las emisiones y capturas de CO_2 equivalente ($[CO_2eq]$), un indicador que permite expresar y comparar las emisiones de diferentes gases de efecto invernadero en términos equivalentes al impacto que tendría el dióxido de carbono (CO_2) en el calentamiento global (IPCC, 2006). De acuerdo con el Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2020), el balance de GEI del país se distribuye en cinco sectores principales:

- Sector energético
- Sector de procesos industriales y uso de productos (IPPU)
- Sector agrícola
- Sector de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)
- Sector de residuos

Esta clasificación permite analizar de manera detallada y técnica el impacto de cada sector en la acumulación de carbono en la atmósfera y así proponer

estrategias específicas de mitigación y adaptación al cambio climático. En particular, la metodología utilizada para el Sector de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS), basada en las “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories V4 Agriculture, Forestry and Other Land Use” (IPCC, 2006), es adoptada por los países signatarios del Acuerdo de París para reportar sus aportes de GEI a la Organización de las Naciones Unidas (ONU). El Acuerdo de París, establece un marco de transparencia que requiere el uso de directrices previamente adoptadas por la Conferencia de las Partes (COP), de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en donde se incluyen las metodologías mencionadas (UNFCCC, 2013, UNFCCC, 2015).

El sector de Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) es el único sector en Chile que actúa como sumidero de CO_2 . Esto se evidencia en la Figura 1.1, que presenta el balance de GEI según el “Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre el Cambio Climático” (MMA, 2020).

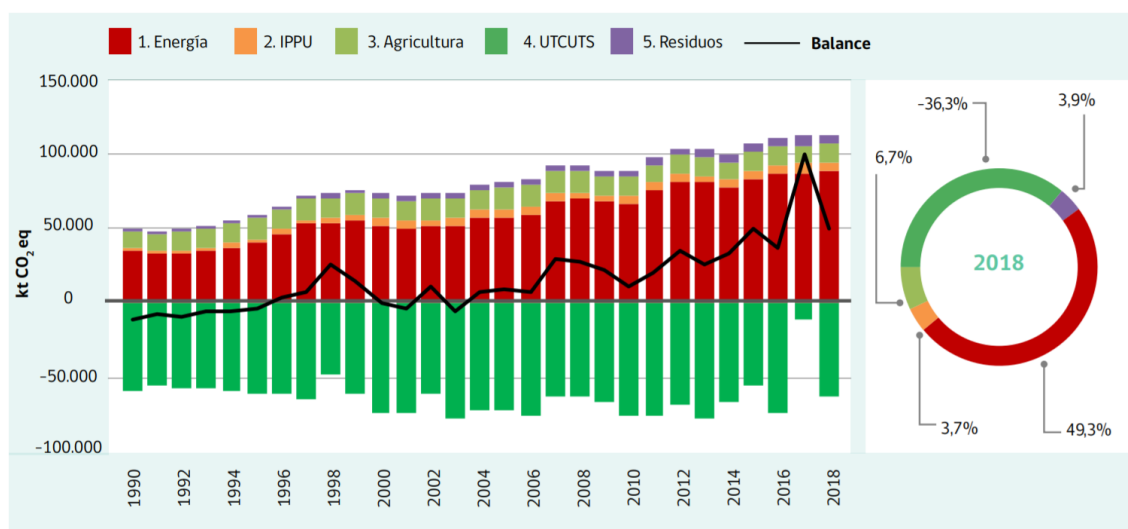


Figura 1.1: Balance de GEI (kt CO_2 eq) por sector en Chile, serie 1990-2018. Tomado del Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2020).

Este sector (UTCUTS), engloba información relacionada con la superficie asignada a distintos usos de la tierra, la producción de trozas y leña, las áreas afectadas por incendios, el crecimiento y existencia de bosques, la densidad de la madera; así como el contenido de carbono en suelos y hojarasca. Esta información es crucial para evaluar y gestionar el papel del sector como sumidero de CO_2 .

En el sector UTCUTS, diversos usos del suelo están asociados con las emisiones y capturas de CO_2 . La Figura 1.2 muestra que el uso del suelo: “tierras forestales”, es un sumidero predominante en comparación con otros tipos de usos. De esta manera, la Figura 1.3 presenta un análisis detallado de las tierras forestales, destacando que su condición de sumidero se debe principalmente al aumento de biomasa, tanto en bosques nativos como en plantaciones forestales.

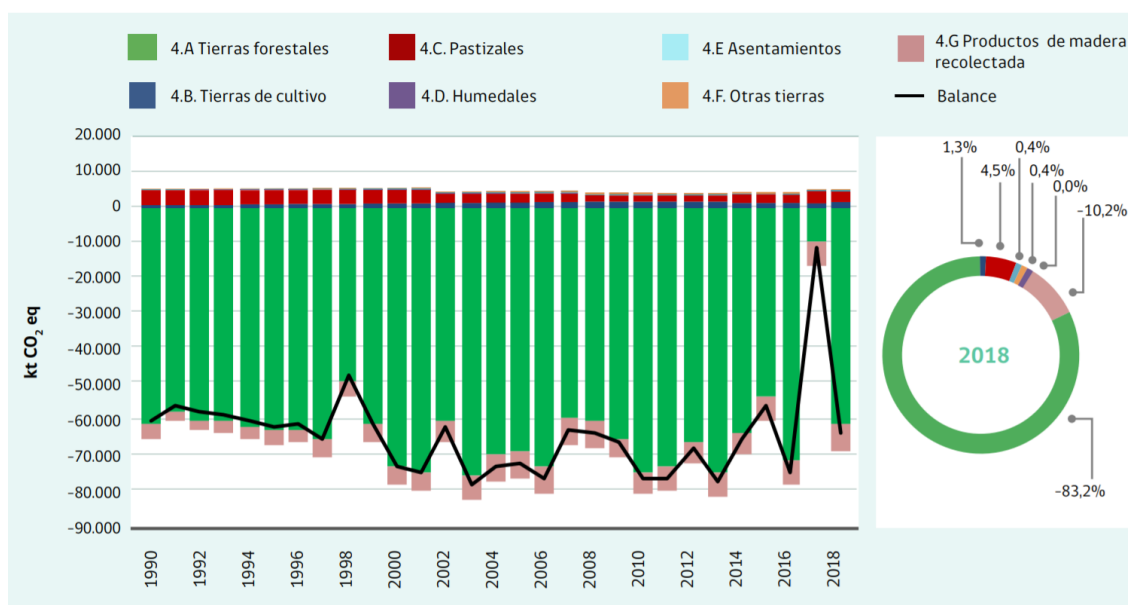


Figura 1.2: Emisiones y capturas de GEI (kt CO_2eq) en el sector UTCUTS por categoría, serie 1990-2018. Tomado de: Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2020).

Cabe señalar que, los compromisos de Chile en relación al balance de GEI, se encuentran en la “Contribución Nacionalmente Determinada” (NDC); la que establece el cumplimiento del Acuerdo de París y la mitigación del cambio climático (Gobierno de Chile, 2020).

Uno de los principales objetivos es que Chile alcance la carbono neutralidad de GEI para el año 2050; lo que implica que el balance de emisiones y capturas de GEI, representado por la línea negra en la Figura 1.1, debería llegar a cero en dicho año. Lo señalado precedentemente, se establece en la “Ley Marco de Cambio Climático”, que fue aprobada y publicada en el Diario Oficial en junio de 2022, comenzando a regir desde entonces como una política de Estado para enfrentar el cambio climático (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022).

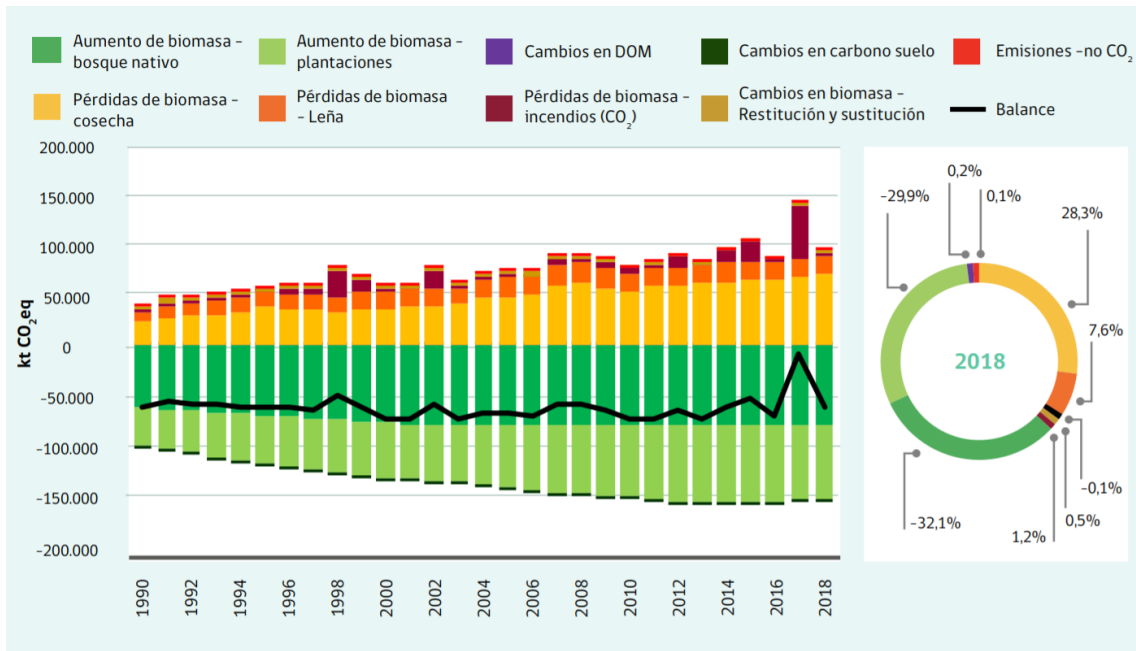


Figura 1.3: Tierras forestales: emisiones y capturas de GEI (kt CO₂eq) por depósito de carbono, serie 1990-2018. Tomado de: Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2020).

Bajo este lineamiento, se han realizado proyecciones tanto para las emisiones de GEI como para las respuestas del sistema climático a estas emisiones. Estas proyecciones incluyen los escenarios RCP y SSP, donde RCP corresponde a "Representative Concentration Pathways" (trayectorias representativas de concentración) y SSP a "Shared Socioeconomic Pathways" (trayectorias socioeconómicas compartidas) (O'Neill et al., 2016). Los escenarios RCP consisten en trayectorias globales de concentraciones de GEI adoptadas por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Taylor et al., 2012) y, por otro lado, los escenarios SSP -también adoptados por el IPCC- son proyecciones globales hasta el año 2100, incluyendo cambios socioeconómicos, vale decir, un análisis integral que aborda la crisis climática como un problema multidimensional (Eyring et al., 2016; Riahi et al., 2017). Estas proyecciones son sustantivas porque representan un instrumento complementario para evaluar el cumplimiento de la NDC de Chile en el marco de las trayectorias de emisiones futuras.

En el contexto de la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, existen dos enfoques principales para abordar este desafío. El primero se centra en la reducción de emisiones de GEI, mientras que el segundo busca aumentar los sumideros de CO₂. Aunque estas estrategias no son mutuamente excluyentes, esta memoria de titulación en ingeniería civil se enfocará en el análisis, modelamiento y proyección del único sector sumidero de CO₂: el sector

UTCUTS (Uso de la Tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura).

1.1. Objetivo general

Análisis de los compromisos climáticos de Chile en el sector UTCUTS en base a los cambios de uso de suelo en las regiones de Chile, las emisiones históricas y proyecciones.

1.2. Objetivos específicos

- Entender y reproducir los modelos de balance histórico de GEI asociados al sector UTCUTS en Chile y reportadas oficialmente a la ONU.
- Cuantificar las trayectorias de emisiones y captaciones de kt CO_2eq a partir de los modelos de balances históricos de GEI del sector UTCUTS.
- Determinar el escenario base futuro de emisiones asociadas al sector UTCUTS, realizar un análisis de sensibilidad y evaluar los compromisos nacionalmente determinados en Chile (NDC).
- Generar series regionales de usos de suelo que puedan ser utilizadas en modelos de calidad de agua, hidrológicos y otros.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Contribución Nacionalmente Determinada (NDC)

En el marco del Acuerdo de París, un acuerdo internacional histórico adoptado en 2015 que busca abordar el cambio climático y sus impactos, los países firmantes deben cumplir con los compromisos establecidos en sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) para avanzar hacia un desarrollo sostenible (UNFCCC, 2015).

La última actualización de la NDC en Chile fue realizada en 2020 (Gobierno de Chile, 2020) y posteriormente fortalecida en 2022, después del llamado internacional a aumentar la ambición en 2021 (Gobierno de Chile, 2022). La Ley Marco de Cambio Climático establece la Estrategia Climática a Largo Plazo (ECLP), una hoja de ruta que detalla cómo el país cumplirá sus compromisos mediante acciones concretas y considerando un horizonte de 30 años (Gobierno de Chile, 2021). Además, la ley reconoce y respalda las NDC, que contienen los compromisos de Chile ante la comunidad internacional en mitigación y adaptación al cambio climático, estableciendo en qué se avanzará (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022).

Para contextualizar la situación de Chile en relación con la problemática del cambio climático, es importante mencionar que, según los NDC, las emisiones del país han aumentado en un 114,7% desde 1990 y en un 20,0% desde 2007. El principal gas de efecto invernadero (GEI) emitido en Chile es el dióxido de carbono (CO_2), seguido por el metano (CH_4). A nivel mundial, el promedio de emisiones de CO_2 por persona es de 4,4 toneladas de CO_2 , mientras que en Chile el promedio es de 4,7 toneladas de CO_2 por persona. Se estima que para 2030 se podrían alcanzar reducciones de aproximadamente el 30% en comparación con

las emisiones de CO₂ de 2016, y en ciertos casos, se podría llegar a un 45 %. Estas estimaciones se basan en el inventario nacional de emisiones de GEI (MMA, 2021, Gobierno de Chile, 2020).

En los NDC de Chile, se establece un compromiso clave relacionado con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el país. Este compromiso consiste en limitar el presupuesto de emisiones de GEI a un máximo de 1.100 millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂eq) en el período comprendido entre 2020 y 2030. Además, se fija un tope máximo de emisiones (pico) para el año 2025 y se plantea el objetivo de alcanzar un nivel de emisiones de 95 MtCO₂eq para 2030 (Gobierno de Chile, 2020). Este compromiso es de relevancia para el sector de Uso del Territorio, Cambio de Uso del Territorio y Silvicultura (UTCUTS), ya que su cumplimiento requerirá de la participación activa de este sector en la reducción de las emisiones netas de GEI en Chile.

En los NDC de Chile, se destacan dos sectores clave en el balance de emisiones: el sector energético como principal emisor de CO₂ y el sector UTCUTS como sumidero de carbono. El enfoque de Chile se centra en disminuir las emisiones de GEI y aumentar los sumideros de carbono, con el objetivo de alcanzar la carbono neutralidad para 2050, tal como se establece en la Ley Marco de Cambio Climático (Gobierno de Chile, 2020; Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2022). Los NDC enfatizan la importancia del sector UTCUTS en este contexto, subrayando la necesidad de aprobar instrumentos de gestión que protejan, mantengan e incrementen los sumideros naturales de carbono en el país, considerando los múltiples servicios ecosistémicos que proporcionan, como la conservación de la biodiversidad, la protección de recursos hídricos y la disminución de impactos por desastres naturales, entre otros (Gobierno de Chile, 2020).

En relación con los compromisos específicos del sector UTCUTS en los NDC de Chile, se destacan los siguientes objetivos:

- Chile se compromete a implementar un manejo sustentable y recuperar 200.000 hectáreas de bosques nativos, lo que representará capturas de GEI de aproximadamente 0,9 a 1,2 MtCO₂eq anuales para 2030 (Gobierno de Chile, 2020).
- El país se propone forestar 200.000 hectáreas, de las cuales al menos 100.000 hectáreas serán de cubierta forestal permanente, con un mínimo de 70.000 hectáreas con especies nativas. La recuperación y forestación se llevará a cabo en suelos de aptitud preferentemente forestal y/o en áreas prioritarias de conservación, lo que generará capturas de entre 3,0 a 3,4 MtCO₂eq

anuales al 2030 (Gobierno de Chile, 2020).

- Chile se compromete a reducir las emisiones del sector forestal provocadas por la degradación y deforestación del bosque nativo en un 25% al 2030, tomando en cuenta las emisiones promedio del período 2001-2013 (Gobierno de Chile, 2020).

2.2. Trayectoria de concentración representativa (RCP)

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha desarrollado trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero basadas en escenarios futuros. En el quinto informe de evaluación del IPCC, se utilizan cuatro Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) para el modelado, cada una representando un futuro distinto en términos de cambio climático (Taylor et al., 2012). Estas trayectorias incluyen RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 y RCP 2.6, como se muestra en la Figura 2.1. La Figura presenta la forzante radiativa en $[W/m^2]$, y los nombres de las trayectorias se derivan de los valores máximos de forzante radiativa en cada escenario. En el sexto informe de evaluación del IPCC (AR6) publicado en 2021, se incorporan dos nuevos escenarios, RCP 1.9 y RCP 7.0 (IPCC, 2021).

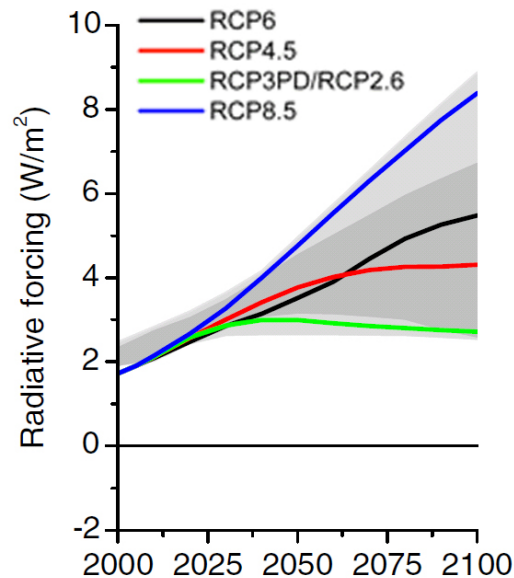


Figura 2.1: Trayectorias de forzante radiativa en función del tiempo. Se muestran las trayectorias de los escenarios RCP 8.5, RCP 6, RCP, 4.5 y RCP 2.6. Tomado de: IPCC, 2014

La relación entre la forzante radiativa y las emisiones de gases de efecto invernadero es crucial para comprender el cambio climático. La forzante radiativa es una medida del desequilibrio energético en la atmósfera causado por las emisiones de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (IPCC, 2013; Ramaswamy et al., 2001). Estos gases atrapan la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, aumentando la temperatura de la atmósfera y, en consecuencia, del sistema climático global. Por lo tanto, un aumento en las emisiones de estos gases implica un aumento en la forzante radiativa, lo que a su vez conduce a un aumento en la temperatura global (IPCC, 2013; Ramaswamy et al., 2001).

En la Figura 2.2, se presenta el cambio relativo de temperatura respecto al período preindustrial (1850-1900) en función del carbono acumulado desde 1850 para cada escenario RCP, tal como se describe en el sexto informe del IPCC (IPCC, 2021). Además, la Figura incluye los escenarios SSP asociados a cada RCP, representados con la notación "SSPn-RCPn", donde el primer número indica el escenario SSP y el segundo, el RCP correspondiente. Por ejemplo, "SSP1-1.9" se refiere al escenario SSP1 asociado al RCP 1.9. Los escenarios que aparecen en la Figura son: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, asociado a los escenarios actuales RCP. Es posible observar de manera clara la magnitud del incremento de temperatura según el escenario, siendo el RCP 8.5 el que muestra el mayor aumento y el RCP 1.9 el menor. En la sección siguiente de este capítulo, se profundizará en los escenarios SSP, que contemplan aspectos socioeconómicos relevantes además de las trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero.

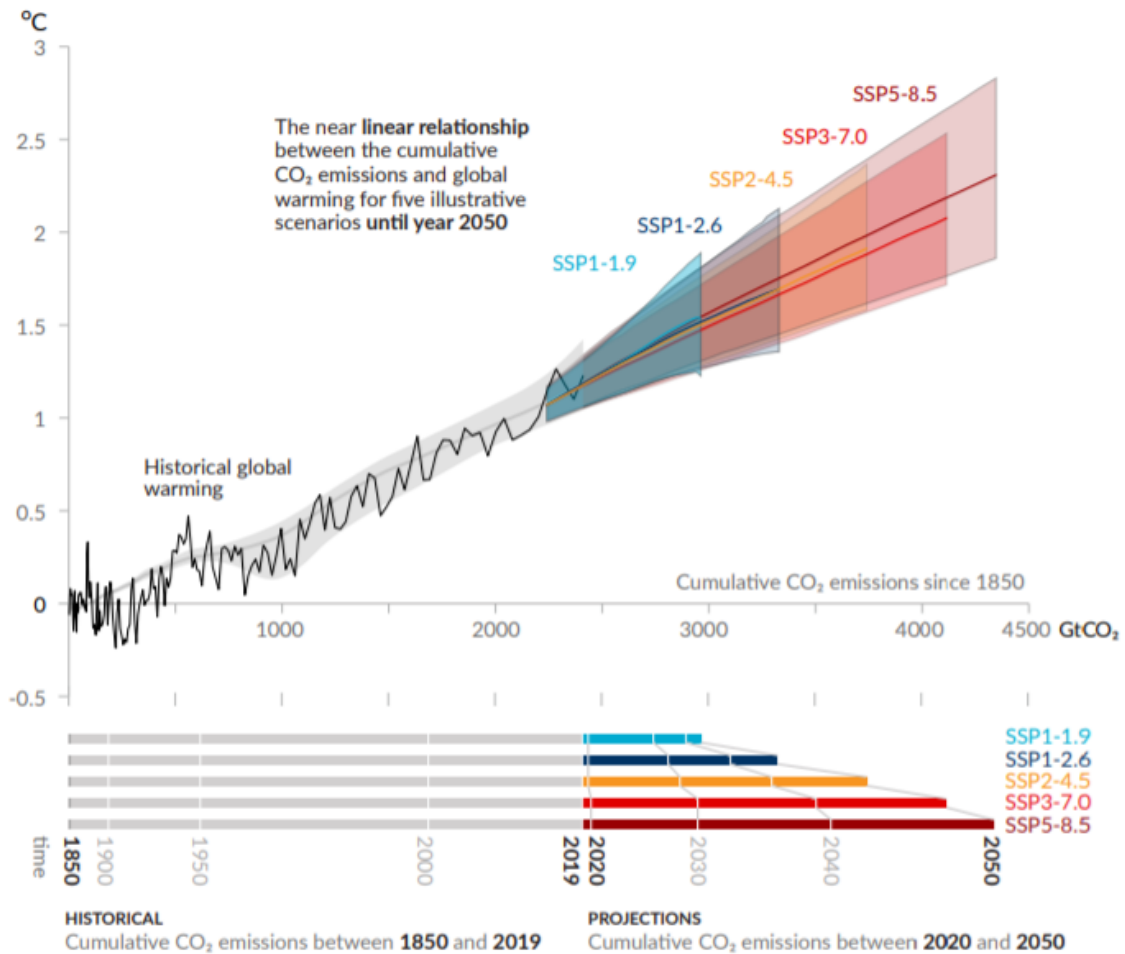


Figura 2.2: Cambio en la temperatura media global respecto al promedio de temperatura del periodo preindustrial (1850 - 1900) en función de las acumulaciones de emisiones antropogénicas de CO_2 desde 1850. Tomado de: AR6 Synthesis Report (IPCC, 2021).

La Figura 2.3 muestra las emisiones globales de CO_2 equivalente en gigatoneladas por año proyectadas para cada escenario RCP, incluyendo su respectiva variabilidad (IPCC, 2014). Esta visualización permite comparar las diferencias en las tasas de emisión de carbono a la atmósfera según los diferentes escenarios. Entre los escenarios mostrados en la Figura, el RCP 2.6 representa el escenario más favorable en términos de reducción de emisiones, mientras que el RCP 8.5 corresponde al escenario más desfavorable en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero.

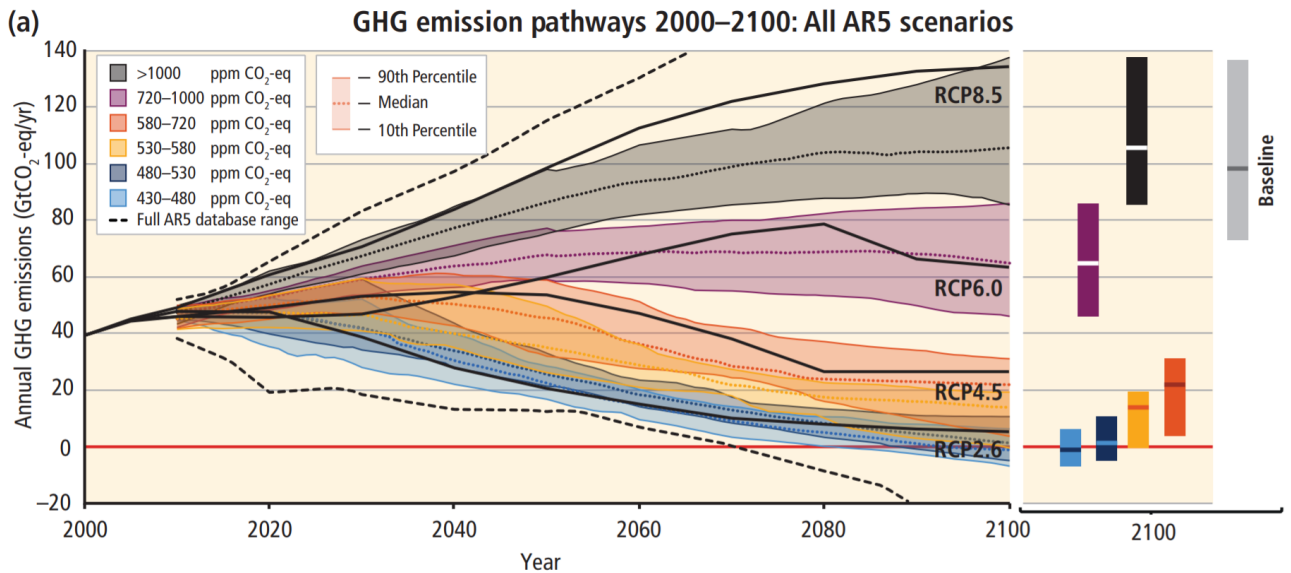


Figura 2.3: Emisiones globales en gigatoneladas de CO_2 equivalente por año proyectadas para cada RCP con su respectiva variabilidad. Tomado de: AR5 Synthesis Report (IPCC, 2014).

2.3. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)

Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) representan escenarios que abordan aspectos socioeconómicos a nivel global y han sido desarrolladas para complementar las RCP en la evaluación de posibles futuros del cambio climático (van Vuuren et al., 2011; O'Neill et al., 2014). Estos escenarios actúan como vías para alcanzar o abordar los RCP. Por ejemplo, es posible abordar RCP 6 o RCP 4.5 siguiendo la trayectoria del SSP2 (O'Neill et al., 2014).

Los SSP definidos incluyen:

- SSP1: Sostenibilidad
- SSP2: Mitad del camino
- SSP3: Rivalidad regional
- SSP4: Desigualdad
- SSP5: Desarrollo impulsado por combustibles fósiles

La Figura 2.4 muestra las proyecciones de aumento de temperatura en función del tiempo, en comparación con la temperatura promedio del período 1850-1900, para los valores promedio de cada uno de los SSP. Por otro lado, la Figura 2.5, basada en el estudio de Riahi et al. (2016), presenta las proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a cada SSP y sus rangos de variabilidad, en conjunto con las proyecciones RCP. El estudio de Riahi et al. (2016) proporciona un panorama general de los SSP y sus implicancias en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, uso de la energía y la tierra a nivel global. Esta información es relevante para el análisis de escenarios futuros en el contexto del presente trabajo (IPCC, 2021).

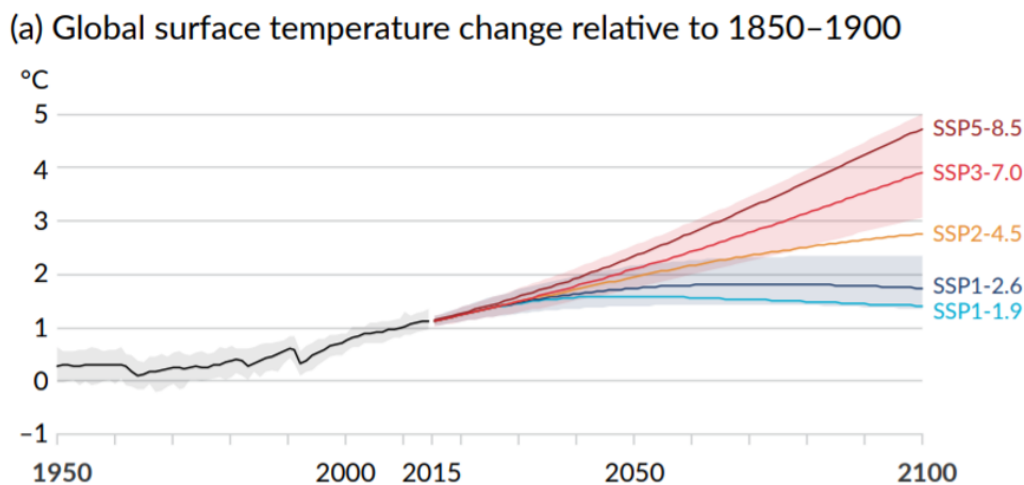


Figura 2.4: Variación de la temperatura en relación con la temperatura media del período 1850-1900 en función del tiempo, y sus proyecciones para diferentes escenarios SSP. La nomenclatura indica también el RCP asociado al escenario; por ejemplo, SSP1-2.6 se refiere al escenario SSP1 con RCP 2.6 (IPCC, 2021).

En la Figura 2.6, se presentan las proyecciones de las áreas de uso del suelo de acuerdo con los diferentes SSP (Riahi et al., 2016). Se consideran principalmente cuatro categorías de uso del suelo: bosques, tierras de cultivo, pastizales y otras áreas naturales. Estas proyecciones proporcionan una referencia valiosa para comprender cómo podrían evolucionar los escenarios futuros en términos de cambios y usos del suelo. Es importante destacar que, según Riahi et al. (2016), un aumento en el uso del suelo para un propósito específico implica una reducción en el uso del suelo para otros propósitos, debido a la interrelación entre los diferentes usos del suelo.

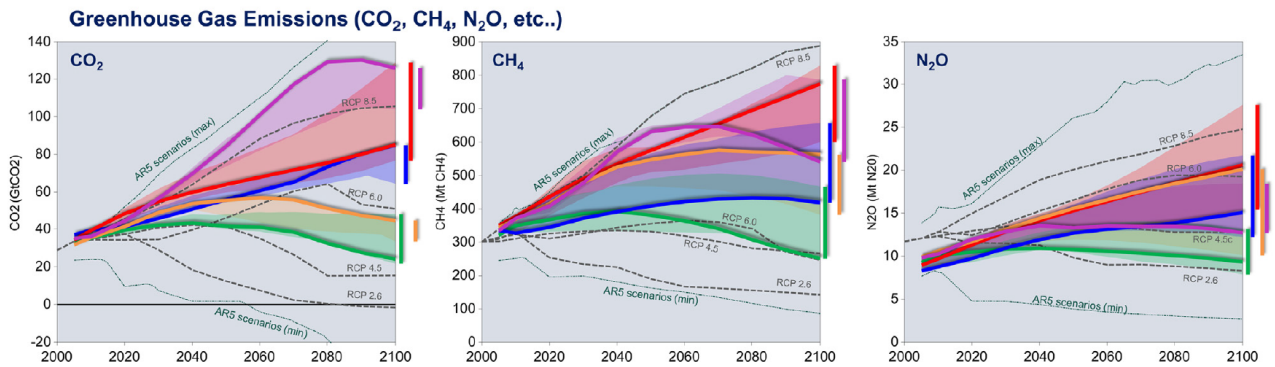


Figura 2.5: Emisiones globales proyectadas para escenarios SSP y sus rangos de variabilidad, en conjunto con las proyecciones RCP (Riahi et al., 2016).

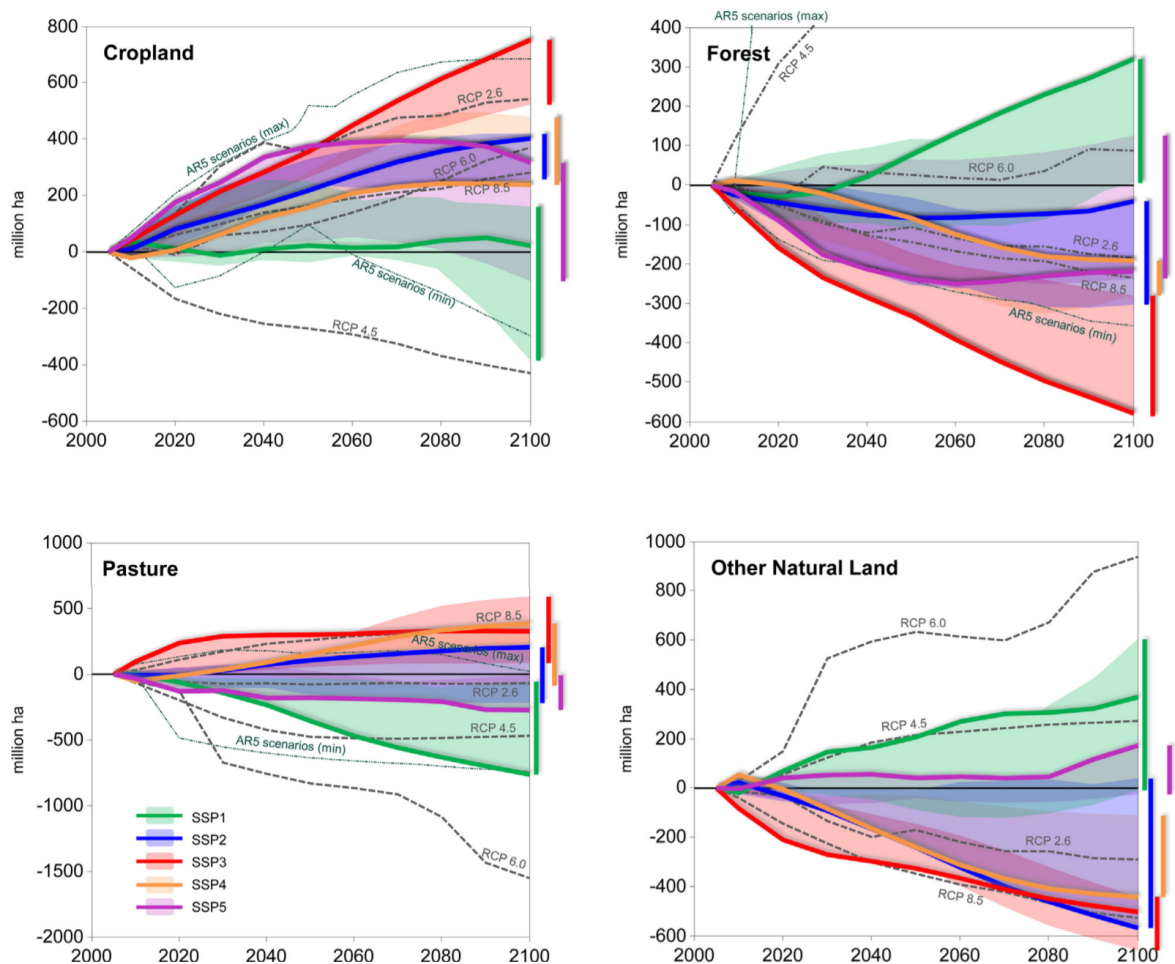


Figura 2.6: Cambios en el uso del suelo en bosques, tierras de cultivo, pastizales y otros tipos de tierras naturales para los marcadores de SSP (Riahi et al., 2016).

En la Figura 2.7, se presentan los costos de mitigación y adaptación al cambio climático según la interacción entre los distintos escenarios SSP y RCP (Van Vuuren et al., 2014). Aquí se observan las combinaciones entre ambas clasificaciones. Como era de esperar, a medida que aumenta el valor del SSP, tanto los costos de adaptación (Figura a) como los costos de mitigación (Figura b) también aumentan. Esto se debe a que, con valores más altos de SSP, la sociedad tiene una menor capacidad para integrar acciones destinadas a abordar la problemática del cambio climático.

Por otro lado, a medida que disminuye el valor del RCP, los costos de adaptación son menores, debido a que los impactos y consecuencias del cambio climático son menos severos en escenarios con menor aumento de temperatura en la Tierra. Sin embargo, los costos de mitigación aumentan a medida que disminuye el RCP. Esto ocurre porque un RCP más bajo implica una menor acumulación global de GEI (ver Figura 2.2) y, por lo tanto, es necesario impulsar la tecnología, la economía y la cultura para alcanzar la neutralidad en carbono, teniendo una menor acumulación de GEI en el tiempo que en escenarios con RCP más altos (Van Vuuren et al., 2014).

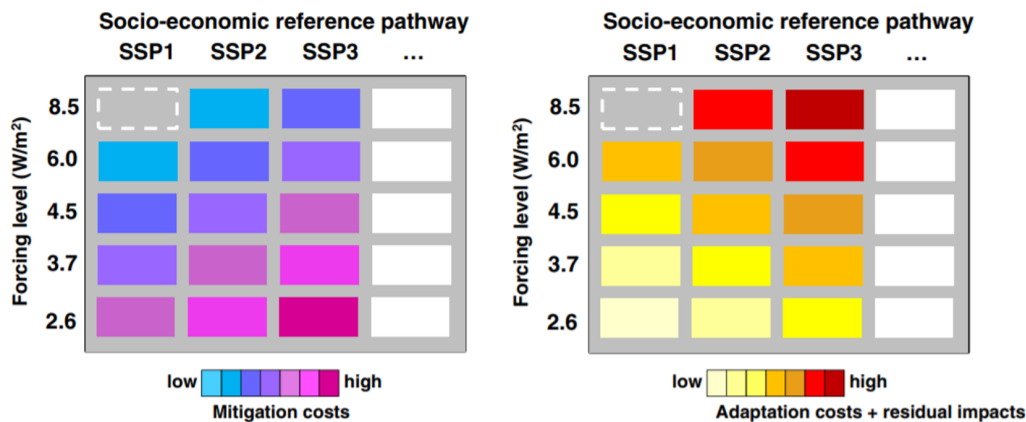


Figura 2.7: Comparativa de costos para el cruce entre escenarios SSP y RCP. A la izquierda se muestran los costos de mitigación y a la derecha los costos de adaptación (Van Vuuren, 2014).

2.4. Marco teórico sobre el modelo de inventario de GEI del sector UTCUTS

Las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2006) establecen las metodologías aceptadas

por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para llevar a cabo los cálculos necesarios en la estimación de emisiones y capturas de GEI. Estas metodologías son utilizadas por los países para estimar y reportar sus emisiones y capturas de GEI en el marco de la CMNUCC y sus compromisos bajo el Acuerdo de París (UNFCCC, 2015). El propósito de reportar estos cálculos es facilitar el seguimiento y la evaluación del progreso de los países en la mitigación del cambio climático y la adopción de acciones adecuadas.

El Volumen 4 de las Directrices del IPCC (2006) aborda específicamente las metodologías aplicables al sector UTCUTS. En el caso de Chile, debido a la disponibilidad de datos, se utilizan principalmente los métodos genéricos del IPCC, que incluyen los niveles 1, 2 y 3, para estimar las emisiones y capturas de carbono (MMA, 2020). Cabe mencionar que las Directrices del IPCC también proporcionan metodologías específicas por cada tipo de uso de suelo. Los métodos genéricos son aplicables de manera similar a todos los tipos de uso de suelo y ofrecen un enfoque estandarizado y comparativo a nivel internacional (IPCC, 2006).

Dentro de los métodos genéricos, los niveles 2 y 3 son más precisos pero requieren una mayor cantidad de información y datos (IPCC, 2006). En algunos casos, Chile utiliza métodos de Nivel 2 o una combinación de Nivel 1 y Nivel 2, dependiendo de la disponibilidad de datos y las características particulares del uso de suelo evaluado (MMA, 2020).

El ciclo del carbono representa un proceso esencial en la interacción entre la biosfera terrestre y la atmósfera. Este ciclo involucra el almacenamiento de carbono en diferentes depósitos y su movimiento entre ellos a través de procesos como la fotosíntesis, la respiración y la transferencia de carbono entre los depósitos mencionados (Le Quéré et al., 2018). La habilidad de los ecosistemas terrestres para almacenar carbono está influenciada por factores como el tipo de vegetación, las condiciones climáticas y la gestión del uso del suelo (Le Quéré et al., 2018).

La Figura 2.8 muestra el ciclo de carbono generalizado para los ecosistemas terrestres del sector UTCUTS, basado en el Volumen 4 de las Directrices para inventarios de GEI del IPCC (2006). El diagrama presenta los depósitos involucrados en el ciclo (biomasa aérea, biomasa subterránea, productos de madera, hojarasca, madera muerta y materia orgánica del suelo) y sus interacciones, incluyendo los flujos entrantes y salientes del sistema. Es necesario evaluar los

cambios en estos depósitos en el tiempo para estimar las emisiones y capturas de GEI en el sector (IPCC, 2006).

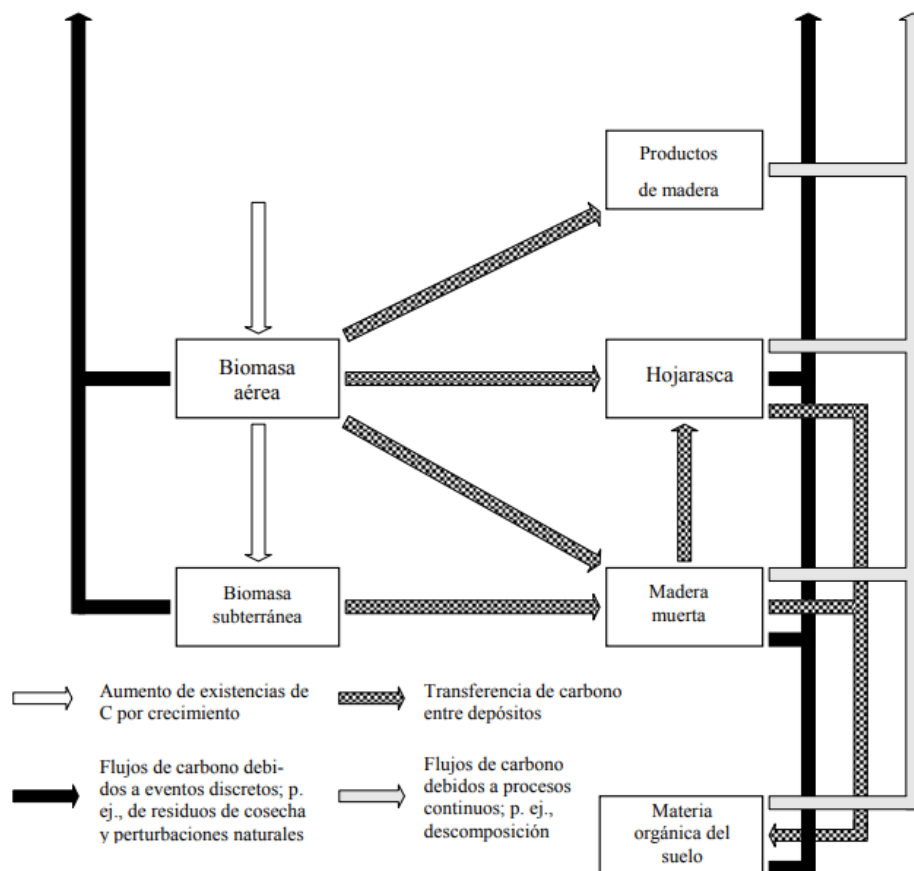


Figura 2.8: Diagrama del ciclo de carbono generalizado para ecosistemas terrestres del sector UTCUTS. Se muestran los depósitos que participan en el ciclo y sus transferencias. Tomado del Volumen 4 de las Directrices para inventarios de GEI del IPCC (IPCC, 2006).

El modelo se centra en las emisiones y capturas de carbono, por lo que es necesario estimar las variaciones en las existencias de carbono en los ecosistemas, considerando la biomasa, la materia orgánica muerta y los suelos. Las existencias de carbono representan las acumulaciones de carbono en los distintos depósitos presentes en estos ecosistemas. Estas estimaciones deben realizarse para cada tipo de uso del suelo: tierras forestales (TF), pastizales (PZ), tierras de cultivos (TC), humedales (HU), asentamientos (AS) y otras tierras (OT). Es relevante mencionar que, en el caso de Chile, las tierras forestales se clasifican en dos

categorías: bosques nativos y plantaciones forestales, donde cada grupo incluye diferentes especies (MMA, 2020).

Un supuesto planteado por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2020) establece que, para usos de suelo diferentes a las tierras forestales (TF), como asentamientos (AS), tierras de cultivo (TC), pastizales (PZ), humedales (HU) y otras tierras (OT), la biomasa se encuentra en equilibrio respecto a las ganancias y pérdidas. No obstante, este supuesto presenta limitaciones que podrían ser discutibles.

En el caso de las tierras de cultivo, se asume que el crecimiento anual de los cultivos se equilibra con las pérdidas anuales de materia seca debido al manejo de los huertos, como podas y limpiezas. Si bien este supuesto podría ser válido al estimar el flujo de carbono para el sector UTCUTS en su conjunto, dado que las magnitudes son significativamente menores que las de las tierras forestales, una estimación más precisa del flujo de carbono dentro de este tipo de uso de suelo requeriría información más específica y detallada que actualmente no está disponible (MMA, 2021).

Una situación similar ocurre con los pastizales (PZ), donde la falta de información impide realizar cálculos más precisos y se asume un equilibrio. MMA (2021) argumenta que en los pastizales sin cambios en el tipo o intensidad de gestión, la biomasa se mantendría en un régimen constante, donde la acumulación de carbono debido al crecimiento vegetal se equilibra con las pérdidas por pastoreo, descomposición y fuego. Este supuesto de equilibrio también se aplica a los asentamientos, otras tierras y humedales, aunque podría ser revisado si se dispusiera de información más precisa sobre estos ecosistemas.

2.5. Usos de suelo actuales en Chile

En 1993, la CONAF inició el proyecto “Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos en Chile”, cuyo objetivo es generar un catastro nacional de usos de la tierra y formaciones vegetales (CONAF, 2021). A continuación, se presentan las definiciones de los distintos tipos de usos de suelo empleados por la CONAF y el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (MMA, 2021):

Tierras forestales (TF):

De acuerdo con la Ley N°20.283 sobre Recuperación de Bosque Nativo y Fomento Forestal, en Chile, los bosques se consideran áreas cubiertas por formaciones vegetales, en las cuales predominan árboles y abarcan una superficie mínima de 5.000 metros cuadrados con al menos 40 metros de ancho. La cobertura de co-

pa arbórea debe ser mayor al 10 % en condiciones áridas y semi-áridas y al 25 % en circunstancias más favorables. Los Bosques Nativos (BN) se definen como aquellos formados por especies autóctonas, provenientes de generación natural, regeneración natural o plantación bajo dosel con las mismas especies existentes en el área de distribución original, pudiendo presentar presencia accidental de especies exóticas distribuidas al azar. Por otro lado, las Plantaciones Forestales (PF) se refieren a plantaciones antropogénicas, generalmente monocultivos de especies exóticas o nativas, de la misma edad, espaciados regularmente en el terreno y con intervenciones significativas para su operación (Gobierno de Chile, 2008).

Tierras de cultivo (TC):

Se refieren a las áreas dedicadas a la producción agropecuaria, incluyendo cultivos de cereales, fruticultura, horticultura y ganadería.

Pastizales (PZ):

Corresponden a formaciones herbáceas, arbustivas, arbustivo-herbáceas, arbustivo-suculentas y suculentas, que abarcan áreas de matorrales y praderas. Aunque pueden contener árboles, su cobertura no supera el 25 % en condiciones húmedas ni el 10 % en condiciones áridas o semiáridas. Además, estos árboles no alcanzan más de 2 metros de altura.

Humedales (HU):

Son superficies cubiertas de agua, ya sea de forma natural o artificial, y pueden ser permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas. Incluyen marismas, pantanos, turberas, cuerpos de agua, vegas y bofedales, debido a su hidromorfismo.

Asentamientos (AS):

Engloban áreas ocupadas por ciudades, pueblos o instalaciones industriales.

Otras tierras (OT):

Se definen como áreas desprovistas de vegetación. En condiciones áridas o semiáridas, la cobertura de vegetación (árboles, arbustos, suculentas y hierbas) no supera el 5 %, mientras que en condiciones húmedas, los árboles no superan el 25 % de cobertura, los arbustos el 10 %, las hierbas el 10 % y las suculentas el 5 %. Incluye zonas cubiertas por nieve, nieves eternas, glaciares y campos de hielo, así como áreas no reconocidas, en las que no ha sido posible detectar vegetación debido a la falta de imágenes o fotografías aéreas o por ser zonas de acceso restringido.

La metodología que utilizó CONAF para la detección de usos de suelo se denomina Carta de Ocupación de Tierras y es una metodología desarrollada por el Centro de Estudios Fitosociológicos y ecológicos Lois Emberger (CEPE de Montpellier) y adaptada por Etienne y Prado en 1982. Con esta metodología la vegetación se describe de múltiples maneras; forma de vida, estructura, cobertura, altura y especies dominantes. Se utilizan sensores remotos, interpretación visual y terrenos para realizar la detección de usos de la tierra. Con esto es posible fabricar la “Matriz de cambio de uso de suelo” que corresponde a una matriz que representa las transformaciones del uso de la tierra entre un año y el siguiente. Con esta información se pueden observar todos los cambios de uso de suelo a nivel nacional para los años que se tenga. Como se comentó en el capítulo anterior la CONAF entregó por ley de transparencia las matrices de cambio de uso de suelo anual entre 1989 y 2018.

El proyecto pone especial énfasis en la identificación de tierras forestales (TF), que incluyen plantaciones forestales (PF) y bosques nativos (BN), debido a su relevancia en la gestión forestal, ambiental y en la implementación de políticas de manejo y conservación de estos recursos. Es importante destacar que las tierras forestales (BN y PF) actúan como sumideros de carbono significativamente mayores en comparación con otros usos de suelo, lo que resalta su importancia en el balance de GEI y en la búsqueda de la carbono neutralidad (MMA, 2020).

Las plantaciones forestales (PF) en Chile corresponden principalmente a usos de suelo dedicados a la producción, siendo en su mayoría monocultivos extensivos. Por otro lado, los bosques nativos son de suma importancia debido a los servicios ecosistémicos que proporcionan, tales como la protección de las aguas y el suelo, la captura de carbono y la conservación del hábitat para la vida silvestre (MMA, 2020).

En las Tablas 2.1 y 2.2 se muestra el detalle de los subtipos (especies) de plantaciones forestales y de bosques nativos respectivamente. Se puede apreciar que no existen las mismas especies en todas las regiones lo cual está directamente relacionado al clima de la zona. Es importante conocer los subtipos de PF y BN porque existe una diferencia importante en cuanto a capturas de CO_2 según la especie que se esté estudiando, ya que cada especie tiene una capacidad diferente de capturar carbono y a su vez ocupan una superficie de uso de suelo diferente. Las Figuras 2.9 y 2.10 muestran la captación por especie a nivel nacional según el MMA para Plantaciones Forestales y Bosques Nativos respectivamente. Es importante tener en cuenta que los valores de captación

mostrados en las Figuras representan las captaciones totales, lo que implica que su magnitud no solo depende de la especie, sino también de la cantidad de usos de suelo. Por ejemplo, en la Figura 2.9, se observa que la especie, *Pinus radiata* tienen una alta capacidad de absorción de carbono, principalmente debido a que son la especie forestal más común en Chile.

Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran la distribución de la superficie de uso de suelo según las especies de plantaciones forestales y bosques nativos, respectivamente. Se puede observar que la presencia de las distintas especies varía entre las regiones del país, lo cual se relaciona directamente con las condiciones climáticas de cada zona. La heterogeneidad en la distribución de especies es relevante, ya que cada especie tiene una capacidad diferente de captura de CO_2 (D’Amato et al., 2011) y ocupa áreas de uso de suelo distintas (CONAF, 2021).

Tabla 2.1: Superficie ocupada en cada región por plantaciones forestales. Todos los valores están en hectáreas [ha]. Fuente de datos: CONAF, 2021

Región	<i>Eucalyptus sp.</i>	<i>Pinus radiata</i>	<i>Populus sp.</i>	<i>Prosopis</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Otras Especies	Total
Arica y Parinacota	21	0	0	0	0	0	21
Tarapacá	0	0	0	28.158	0	1.107	29.264
Antofagasta	0	0	0	717	0	2.333	3.050
Atacama	270	0	0	0	0	7	276
Coquimbo	2.988	0	0	531	0	8.766	12.285
Valparaíso	54.538	13.057	0	0	0	1.163	68.758
Metropolitana	9.024	0	4	0	0	153	9.181
O’Higgins	49.696	77.771	1.732	0	0	1.338	130.536
Maule	69.344	540.662	3.856	0	7	21.024	634.893
Ñuble	99.164	258.115	1.304	0	23	22.110	380.715
Biobío	325.041	522.000	2.185	0	288	25.664	875.178
La Araucanía	274.655	336.041	288	0	8.897	12.408	632.289
Los Ríos	85.492	116.420	373	0	5.109	1.382	208.775
Los Lagos	69.731	22.597	574	0	1.990	1.707	96.599
Aysén	2,8	0	57,4	0	4.336	27.621	32.017
Magallanes y de La Antártica	0	0	0	0	0	286	286
Total	1.039.965	1.886.664	10.374	29.406	20.649	127.068	3.114.125

Tabla 2.2: Superficie ocupada en cada región por bosques nativos. Todos los valores están en hectáreas [ha]. Fuente de datos: CONAF, 2021

Región	<i>Alerce</i>	<i>Ciprés de las Guaitecas</i>	<i>Araucaria</i>	<i>Ciprés de la Cordillera</i>	<i>Lenga</i>	<i>Coihue de Magallanes</i>	<i>Roble-Hualo</i>	<i>Roble-Rauti-Coihue</i>	<i>Coihue-Rauti-Tepa</i>	<i>Esclerófilo</i>	<i>Siempreverde</i>	<i>Palma Chilena</i>	Total
Arica y Parinacota	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47151	0	0	47151
Tarapacá	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33246	0	0	33246
Antofagasta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11899	0	0	11899
Atacama	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3224	0	0	3224
Coquimbo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48194	281	0	48475
Valparaíso	0	0	0	49	0	0	1224	0	0	475194	0	7648	484116
Metropolitana	0	0	0	76	0	0	10348	0	0	350437	0	3094	363955
O’Higgins	0	0	0	2901	0	0	33187	0	0	418879	0	4343	459310
Maule	0	0	0	12960	9681	0	172737	172506	0	213631	0	0	581515
Ñuble	0	0	0	6076	49908	0	13375	153974	3679	19390	1578	0	247980
Biobío	0	0	38796	18220	97709	0	0	360084	48416	20755	13593	0	597573
La Araucanía	0	0	199460	13560	108655	0	0	470860	120421	636	50562	0	964153
Los Ríos	7770	83	13961	0	143023	4337	0	252801	280321	203	206032	0	908531
Los Lagos	208360	43088	0	19163	509898	126502	0	244655	393084	499	1282188	0	2827436
Aysén	0	159334	0	0	1400378	939169	0	0	0	0	1899864	0	4398746
Magallanes y de La Antártica	0	228094	0	0	1373880	888098	0	0	0	0	270105	0	2760177
Total	216130	430598	252217	73006	3693131	1958106	230870	1654880	845921	1643340	3724201	15085	14737486

Las Figuras 2.9 y 2.10 ilustran la captura de carbono por especie a nivel nacional para plantaciones forestales y bosques nativos, respectivamente, según datos del MMA. Cabe destacar que los valores en las Figuras representan las capturas totales, lo que implica que su magnitud depende tanto de la capacidad de cada especie para capturar carbono como de la superficie ocupada. Por ejemplo, en la Figura 2.9, se aprecia que la especie, *Pinus radiata*, presenta una alta captura total de carbono, lo cual se debe en gran medida a su extensa distribución en Chile, más allá de su capacidad intrínseca para capturar carbono (CONAF, 2021).

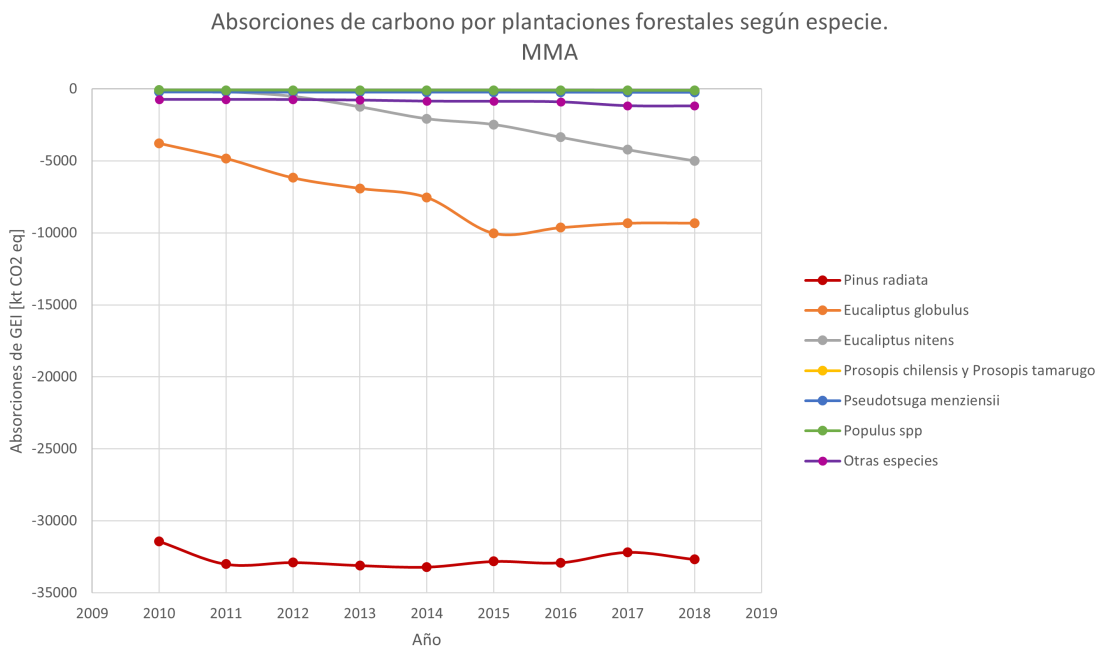


Figura 2.9: Serie de tiempo de las capturas totales nacionales de carbono por especie de plantaciones forestales en [kt CO_2 eq] según el Ministerio de medio ambiente.

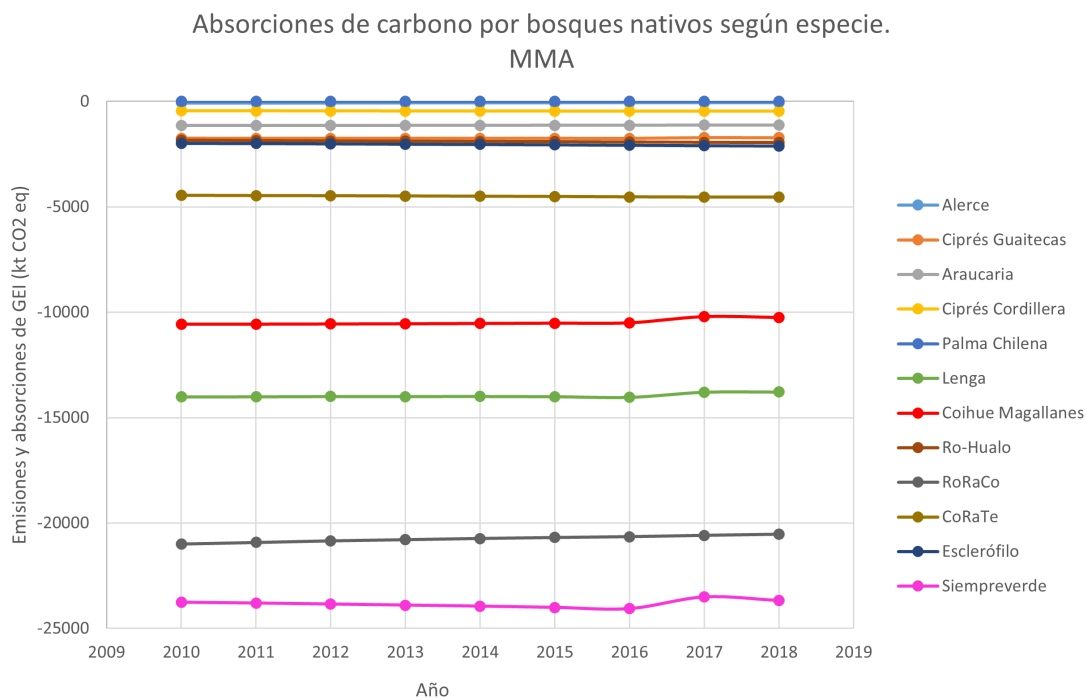


Figura 2.10: Serie de tiempo de las capturas totales nacionales de carbono por especie de bosques nativos en [kt CO_2 eq] según el Ministerio de medio ambiente.

El catastro de la CONAF actualizado hasta agosto de 2021 proporciona información detallada sobre las superficies de usos de suelo en Chile según su tipo y, en el caso de tierras forestales (TF) y plantaciones forestales (PF), según especie (CONAF, 2021). La Figura 2.11 ilustra la distribución de los usos de suelo por región, siguiendo las categorías del IPCC para el inventario de GEI. En esta Figura, se muestran los distintos tipos de usos de suelo y su distribución en gráficos de torta para cada región.

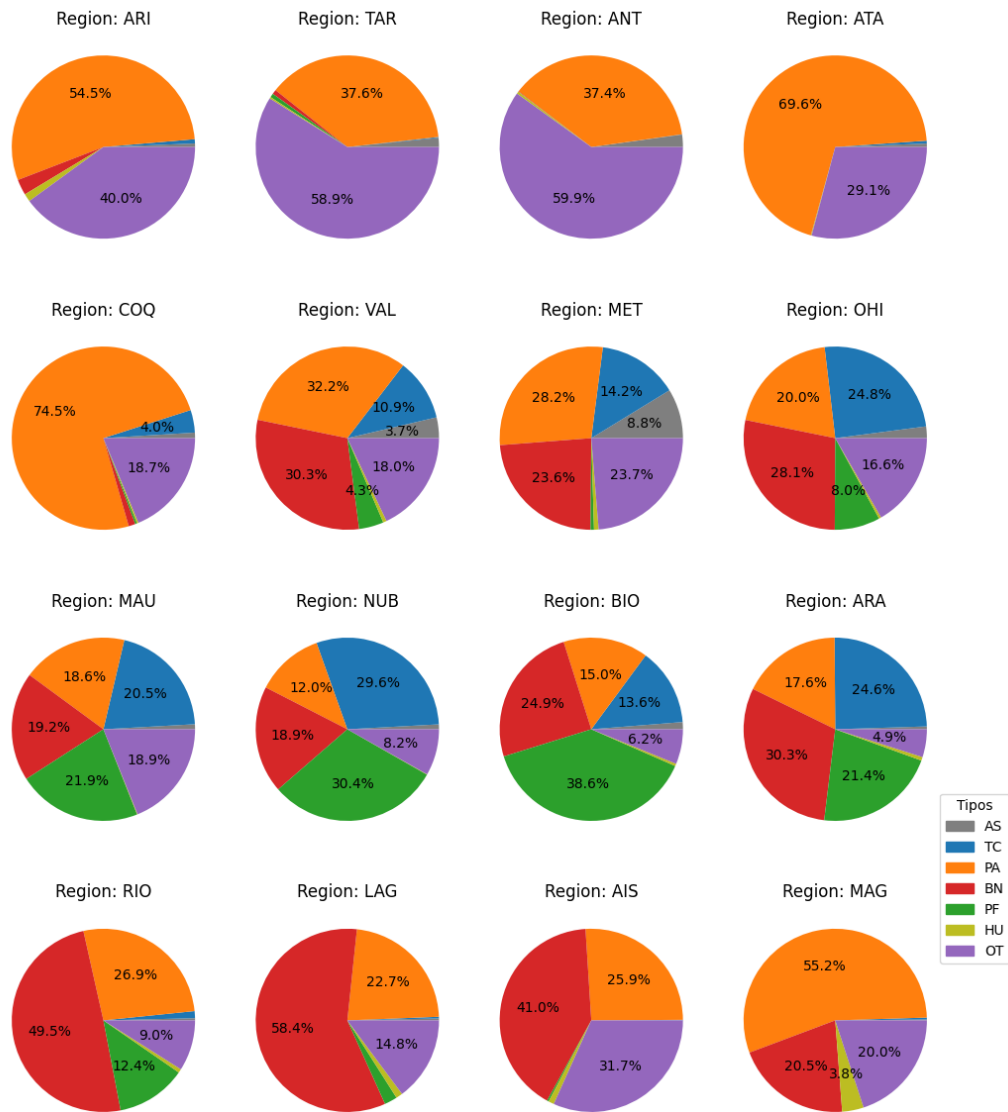
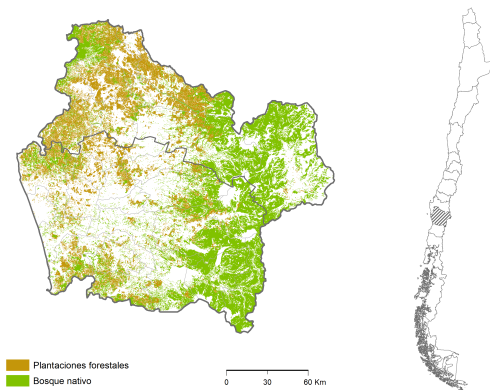


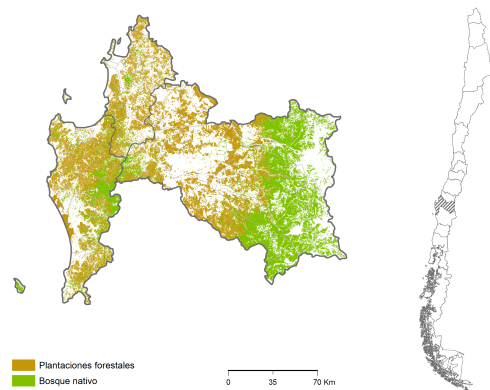
Figura 2.11: Uso de suelo porcentual para cada una de las regiones de Chile. Los nombres de las regiones se encuentran abreviados.

Es importante mencionar que el catastro representa un estado específico en el tiempo, el más actualizado, y no muestra los cambios en el uso del suelo a lo largo de los años. Sin embargo, estos datos son fundamentales para estimar las capturas de carbono históricas y proyecciones en el sector UTCUTS, debido a que nos permite tener un punto de partida para desagregar las series históricas de usos de suelo nacionales a nivel regional y por especie en el caso de las tierras forestales y plantaciones forestales. Las series históricas nacionales son presentadas en la siguiente sección.

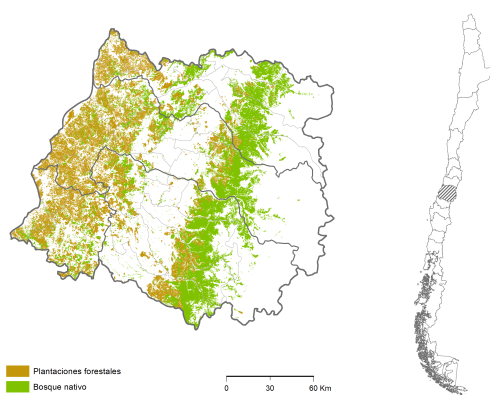
Respecto a las tierras forestales, en la Figura 2.12, se muestran mapas para algunas regiones de Chile (Figura 4.2) en donde se puede apreciar que el uso de suelo de las PF es considerable y comparable con los usos de suelo de BN.



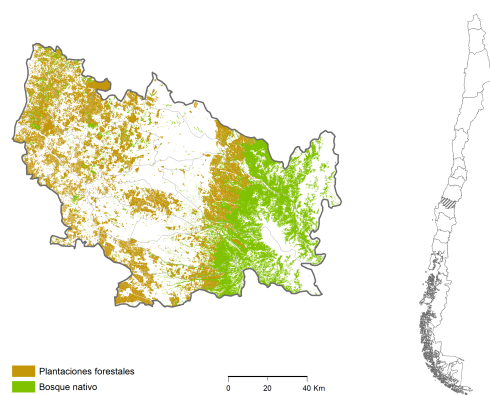
(a) Región de la Araucanía



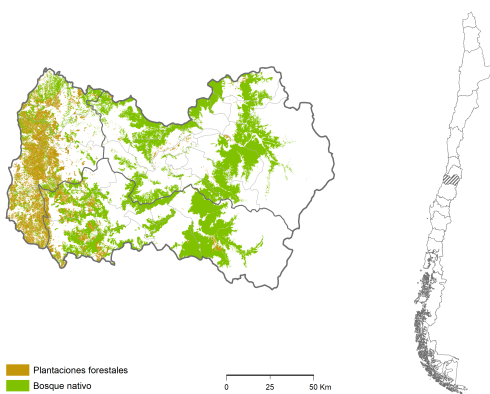
(b) Región del Biobío



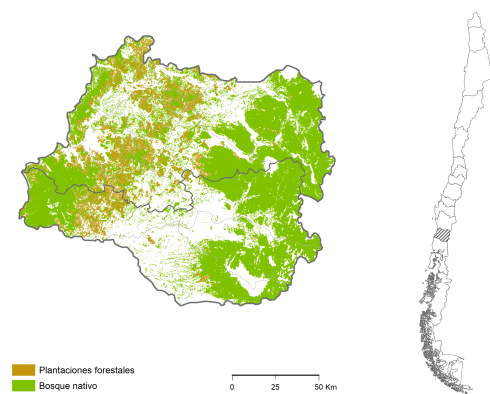
(c) Región del Maule



(d) Región de Ñuble



(e) Región de O'Higgins



(f) Región de los Ríos

Figura 2.12: Mapas que muestran la detección de Plantaciones Forestales y Bosques Nativos actuales para diferentes regiones de Chile. Fuente: INFOR, 2023

2.6. Cambio y uso de suelo histórico nacional

Para obtener las Matrices de Cambio y Uso de Suelo MCUS históricas nacionales se debe realizar una solicitud por Ley de Transparencia a la CONAF. Las matrices de cambio y uso de suelo se conFiguran como la que se muestra en el ejemplo de la Tabla 2.3. Estas matrices contienen la información de los cambios de usos de suelo para los tipos de usos de suelo (AS, TC, PA, BN, PF, HU y OT). Si en cada matriz se considera el año actual y el anterior, en las columnas se señala en que tipo de uso de suelo se encuentra en el año “actual” y las filas en que uso de suelo se encontraban en el año anterior. Entonces si una celda señala en la fila PA y en la columna TC significa que el valor de esa celda corresponde a las hectáreas que cambiaron desde pastizales a tierras de cultivo. Los valores en la diagonal corresponden a los usos de suelo que no tuvieron cambios entre un año y otro. Es importante mencionar que en esta clasificación solo se tienen los tipos y no está separado por especies.

Tabla 2.3: Matriz de cambio y uso de suelo nacional entre el año 2011 y 2012 (CONAF, 2022).

Tipo Uso Suelo	AS	TC	PA	BN	PF	HU	OT	TOTAL 2011
AS	474352	0	0	0	0	1	0	474353
TC	3391	3202009	5633	0	19845	387	0	3231266
PA	1827	13704	21120528	17827	21787	240	84	21175997
BN	488	2919	7072	16409233	10142	92	508	16430455
PF	279	1793	2682	1931	2925065	42	12	2931804
HU	47	252	351	0	176	4794486	66	4795378
OT	392	0	0	0	0	0	26540222	26540614
TOTAL 2012	480776	3220677	21136267	16428991	2977015	4795248	26540893	75579867

2.7. Impactos por cambios en el uso del suelo

Los cambios en los usos de suelo tienen importantes consecuencias ambientales, económicas y sociales. Se ha observado un aumento en la superficie forestal y una disminución en las áreas de bosque nativo y tierras de cultivo en muchos lugares del mundo (Lepers et al., 2005; Potapov et al., 2017). La expansión de las plantaciones forestales puede mejorar la calidad del aire, pero también puede afectar negativamente la biodiversidad y la calidad del agua (Grêt-Regamey et al., 2015). Además, las plantaciones forestales suelen estar asociadas a la expansión de monocultivos y a la eliminación de especies nativas, lo que puede reducir la resiliencia de los ecosistemas (Chazdon et al., 2016).

La disminución de las áreas de bosque nativo tiene importantes consecuencias en la biodiversidad, la calidad del agua y la mitigación del cambio climático

(Brancalion et al., 2019). La pérdida de bosque nativo ha sido un factor importante en la extinción de muchas especies animales y vegetales (Díaz et al., 2019). Además, la eliminación de los bosques nativos puede tener un efecto negativo en la calidad del agua, ya que los bosques actúan como un filtro natural para la lluvia y evitan la erosión del suelo (DeFries et al., 2004).

En cuanto a la disminución de las tierras de cultivo, esto puede tener importantes consecuencias para la seguridad alimentaria y la economía local. La reducción de las tierras de cultivo ha sido un factor importante en el aumento de los precios de los alimentos en muchos lugares del mundo (Brenes et al., 2018). Además, la disminución de las tierras de cultivo puede tener un efecto negativo en la economía local, ya que muchas comunidades rurales dependen de la agricultura para su sustento (Brenes et al., 2018). Para abordar estos desafíos, es fundamental implementar políticas y prácticas de gestión adecuadas que consideren las múltiples dimensiones y consecuencias de los cambios en el uso del suelo.

2.8. Emisiones por incendios y consumo de leña y trozas

Los datos históricos de superficies de incendios forestales son publicados por la Gerencia de Protección contra Incendios Forestales de la CONAF y clasificados según los tipos de bosques (PF o BN) (CONAF, 2021). En la Figura 2.13 se observan las series históricas de incendios forestales en Chile. Algunas especies, como el *Pinus radiata* y el *Eucalyptus*, son separadas en la clasificación.

Un factor importante en la tendencia del balance de GEI es la ocurrencia y magnitud de incendios forestales, ya que pueden modificar notoriamente la capacidad de sumidero del sector UTCUTS afectando directamente el balance de GEI. Esto se puede apreciar en la misma Figura 2.13 en el año 2017, año en el cual ocurrieron incendios forestales de magnitudes y escalas superiores (CONAF, 2022). Es por esto que, para ese año en particular, el balance de GEI del sector UTCUTS disminuye bastante su condición de sumidero, y en consecuencia, el balance nacional de GEI aumenta sus emisiones. Cabe mencionar que también ocurrió un incendio de escalas superiores recientemente a inicios del 2023, pero que queda fuera del alcance de este trabajo debido a la disponibilidad de información, ya que es un evento reciente.

Series históricas de incendios en Chile

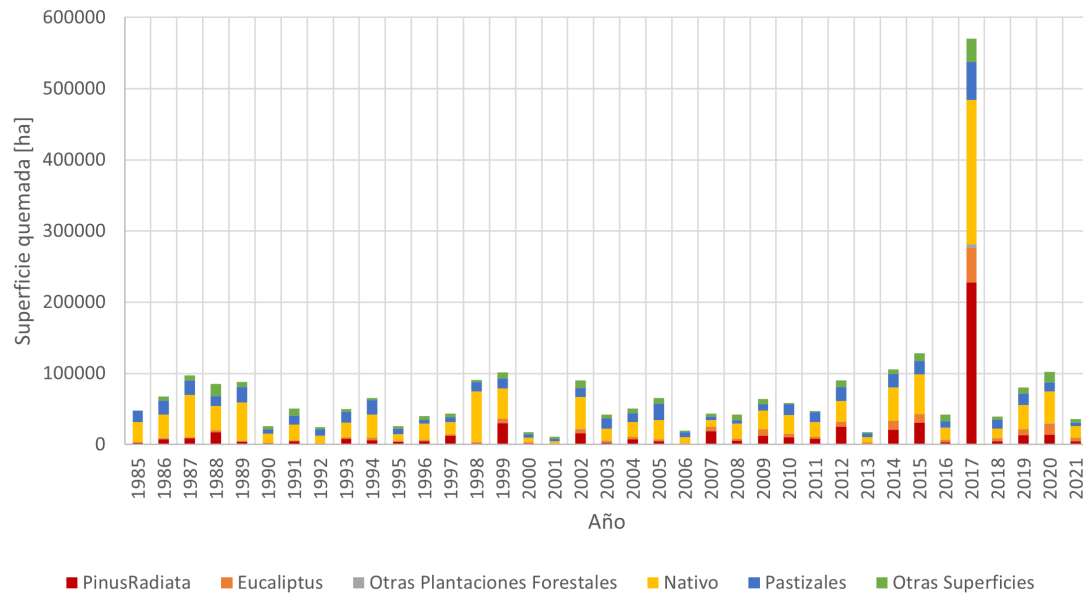
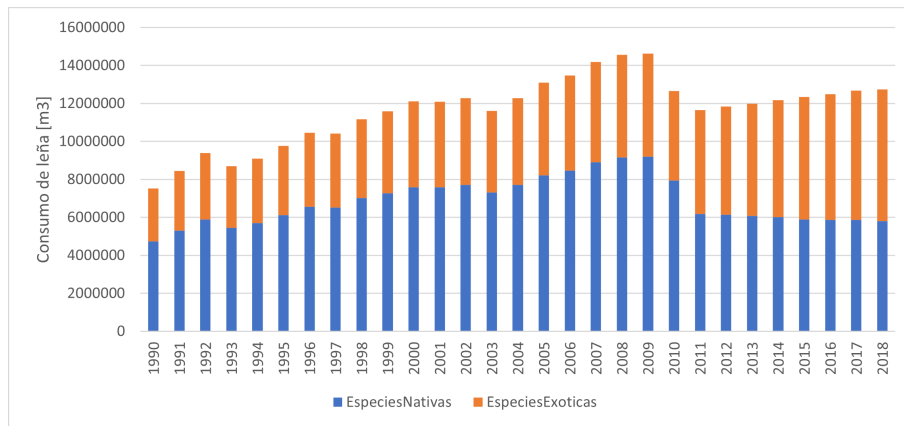


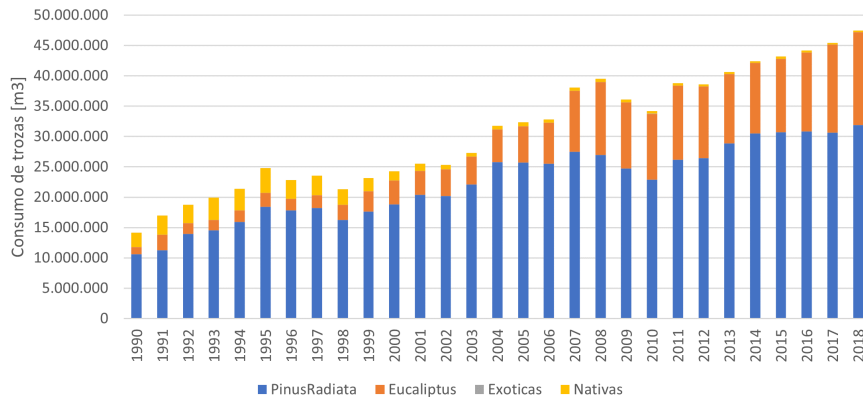
Figura 2.13: Serie de tiempo de la superficie anual incendiada en Chile. Fuente de datos: CONAF, 2021

Los incendios forestales no solo tienen un impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también en la biodiversidad y el ecosistema en general. Los incendios pueden causar la degradación del suelo, erosionar los ríos, aumentar el riesgo de deslizamientos de tierra y reducir la capacidad de absorción de carbono de los bosques (Certini, 2005; Adams, 2013). Además, la ocurrencia de incendios forestales se ha visto afectada por el cambio climático, lo que hace que la prevención y el manejo de incendios sean cada vez más críticos en la mitigación de los efectos del cambio climático (Abatzoglou & Williams, 2016).

Por otro lado, los datos de consumo de leña y trozas se muestran en la Figura 2.14. Estos son clasificados según los tipos de bosques (PF o BN) (MMA, 2020) y son la base de los cálculos de emisión por consumo del MMA, por lo que son utilizados en el modelo desarrollado.



(a) Consumo de leña



(b) Consumo de trozas

Figura 2.14: Serie de consumo nacional de leña y trozas en $[m^3]$.
Fuente de datos: MMA, 2020.

2.9. Series de usos de suelo en modelos de hidrología y calidad del agua

En el contexto de la hidrología y la calidad del agua, es común utilizar modelos que toman en cuenta la información de los usos de suelo de la región en la que se encuentran, como el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Gassman et al., 2007). Para mejorar la precisión de estas proyecciones en el futuro, es posible utilizar la información regional para realizar cambios en los usos de suelo a lo largo del tiempo en los modelos (Arnold et al., 2012). Esto puede ser realizado para varios pasos temporales y luego se puede utilizar la interpolación o regresión para generar proyecciones futuras más acertadas. Al implementar esta estrategia, se puede lograr una mejor comprensión de los cambios en la calidad del agua y la hidrología en una región determinada, lo que permitiría la toma de decisiones informadas en cuanto a la gestión de recursos hídricos (White & Chaubey, 2005).

La evaluación de escenarios de usos de suelo futuros es esencial para los modelos de calidad de agua (Clark et al., 2016). Estos modelos utilizan la información de usos de suelo para simular el impacto de cambios en el uso del suelo y el clima en los recursos hídricos y la calidad del agua de las cuencas hidrográficas. Aunque la consideración de múltiples escenarios de usos de suelo futuros puede aumentar la dispersión de los resultados, es importante seleccionar escenarios factibles para la zona de interés con el fin de mejorar la representación de la incertidumbre en las predicciones de los modelos de calidad de agua (Shepherd et al., 2018).

En este contexto, Clark et al. (2016) destacan la importancia de caracterizar la incertidumbre en los impactos hidrológicos del cambio climático, mientras que Shepherd et al. (2018) proponen el uso de enfoques basados en “storylines” como una alternativa para representar la incertidumbre en los aspectos físicos del cambio climático. Estos enfoques permiten la construcción de narrativas coherentes y plausibles que reflejen los diversos posibles cambios en los usos del suelo y su impacto en la hidrología y la calidad del agua.

Además de considerar múltiples escenarios de usos de suelo futuros, es crucial examinar la influencia de distintos periodos de referencia para separar los impactos del cambio climático y los cambios en el uso del suelo en la hidrología de cuencas (Zhang et al., 2018). Esto permitiría una mejor comprensión de cómo los cambios en el uso del suelo y el clima afectan la calidad y cantidad de agua en las cuencas hidrográficas.

Es importante tener en cuenta también los cambios en el uso del suelo inducidos por el ser humano y su impacto en la hidrología (Garg et al., 2019). Estos cambios pueden afectar el ciclo hidrológico y los recursos hídricos a través de la modificación de la infiltración, la evapotranspiración, el escurrimiento superficial y el almacenamiento de agua en el suelo.

Mahmood et al. (2010) destacan la necesidad de investigar más a fondo el impacto de los cambios en el uso del suelo/la cobertura del suelo en el clima y establecer prioridades de investigación futuras en este ámbito. La comprensión de estos impactos permitirá abordar de manera más efectiva los desafíos en la gestión de recursos hídricos y la adaptación al cambio climático.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Estimación MCUS regionales

En el presente capítulo se explica el proceso para la obtención de las matrices de cambio y uso de suelo regional (MCUSR). Para esto se realizan dos procesos de optimización; el primero obtiene las superficies totales por tipos de usos de suelo (AS, TC, PA, BN, PF, HU y OU) para cada región en el tiempo y el segundo obtiene las MCUSR.

Para abordar el primer proceso de optimización vale la pena describir los valores con la siguiente configuración que muestra una matriz y dos vectores:

$$\begin{array}{c} \text{tipo } i \\ \left(\begin{array}{ccc} t_{11k} & & t_{irk} \\ & \dots & \\ t_{irk} & & t_{nmk} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} R_1 \\ \dots \\ R_m \end{array} \right) \\ \text{región } r \\ \left(T_{1k} \quad \dots \quad T_{nk} \right) \end{array} \quad (3.1)$$

En donde cada t_{irk} corresponde a la superficie que utiliza el tipo i en la región r en el año k . T_{ik} representa el total nacional de superficie para el tipo i en el año k y R_r corresponde a la superficie regional total.

Cada año debe cumplir con que las superficies de las regiones no varíen y que los totales nacionales del tipo i correspondan a la suma de las superficies del tipo i en cada región. Esto se traduce en:

$$\sum_{j=1}^m t_{ijk} = R_j \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_{ijk} = T_{ik} \quad (3.3)$$

Los datos históricos de las MCUSN entregadas por CONAF por ley de transparencia contienen los usos de suelo totales nacionales clasificados por tipo para el periodo de estudio. Vale decir, se tiene T_{rk} para todas las regiones r y años k . Se tiene información desde 1989 hasta el 2018. También se tienen los totales de las regiones R_r .

Respecto a la superficie que utiliza el tipo i en la región j en el año k (t_{irk}), se tiene solo la información más actualizada proporcionada por la CONAF, por lo que se conocen para el último año k , pero no se tiene para todos los años.

Para obtener las superficies t_{irk} se considera que las superficies del año siguiente t_{irk+1} son conocidas, pues se tiene la información del estado último de usos de suelo. Entonces, se inicia el cálculo con la siguiente configuración:

$$r \begin{pmatrix} & i \\ t_{11k} & t_{irk} \\ & \dots \\ t_{irk} & t_{nmk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 \\ \dots \\ R_m \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} T'_{1k} & \dots & T'_{nk} \\ T_{1k} & \dots & T_{nk} \\ e_{1k} & \dots & e_{nk} \end{pmatrix}$$

Donde inicialmente $t_{irk} = t_{irk+1}$ y T'_{ik} es un total auxiliar que, al igual que T_{ik} , corresponde al total nacional del tipo i , pero considerando la matriz en su estado actual. Como T_{ik} es conocido se puede calcular el error e_{ik} asociado al tipo i en el año k como $e_{ik} = T_{ik} - T'_{ik}$.

Luego, para cada tipo i se reparte el error e_{ik} proporcionalmente según su estado actual obteniendo el nuevo estado de t_{irk} , en donde, los errores asociados a los tipos se anulan, $e_{ik} = 0$, y por ende, $T_{ik} = T'_{ik}$. Esto conlleva al siguiente estado:

$$\sum_{i=0}^n a_{ijk} = T_{jk-1} \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=0}^n a_{ijk} = T_{ik} \quad (3.8)$$

El objetivo es entonces calcular las superficies de cambio y uso de suelo regional, a_{ijk} , que representa en el año k la superficie que actualmente es del tipo i y en el año anterior era del tipo j . Para obtener estos valores se utiliza la misma metodología descrita para el primer proceso de optimización, por lo que se necesita un estado inicial para la matriz a_{ijk} para comenzar la iteración. Este se obtiene considerando las proporciones de la MCUS nacional del año k entregadas por la CONAF (CONAF, 2022) y ponderando por el total de la región. Así se tiene como estado inicial una matriz de cambio y uso de suelo regional que mantiene las proporciones nacionales y el total de superficie regional. Luego se calcula el error para las filas (totales por tipo i para el año actual) y se reparte proporcionalmente, luego se calcula el error para las columnas (totales por tipo j para el año anterior) y se reparte proporcionalmente. Esto último se repite iterativamente hasta que la suma de los errores convergen al mínimo.

Finalmente, para obtener la desagregación por especie, se asume la misma proporción regional del detalle que se tienen publicados oficialmente (CONAF, 2021), para todos los años. Con esto, se obtienen las MCUSR separada por tipos y especies.

3.2. Proyección balance de GEI en el sector UTCUTS

El modelo para el balance de carbono tiene como objetivo estimar las emisiones y capturas de gases de efecto invernadero relacionadas con los depósitos de carbono presentes en los ecosistemas terrestres (sector UTCUTS). Este balance se centra en los flujos de carbono entre los distintos depósitos de los ecosistemas, tal como se muestra en la Figura 3.1.

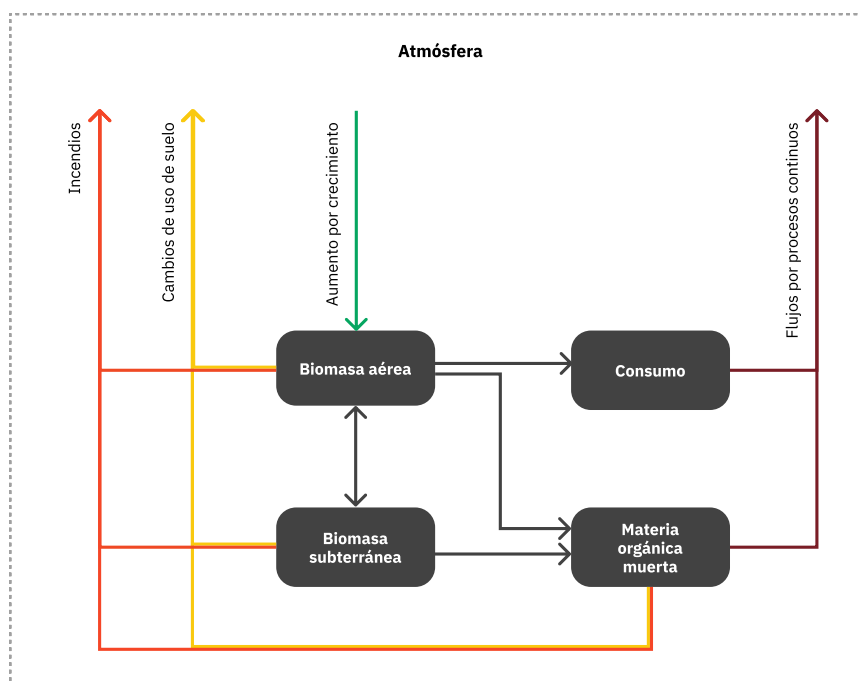


Figura 3.1: Ciclo de carbono considerado en el modelo desarrollado.

Según los datos del Ministerio del Medio Ambiente, los depósitos de materia orgánica del suelo (no considerados en el diagrama anterior) representan aproximadamente un 0,01 % del balance total (MMA, 2020), por lo que este depósito se considera despreciable para este análisis y no se consideran en el cálculo de esta memoria de titulación.

Debido a que los parámetros del modelo de balance de carbono dependen de factores como la zona, especie y tipo de uso de suelo, los cálculos se realizan a nivel regional. Esto permite un análisis detallado de la dinámica de los ecosistemas en relación con las emisiones y capturas de gases de efecto invernadero. Al sumar los resultados de cada región, se obtienen los totales nacionales, proporcionando una visión integral del comportamiento del país en cuanto a emisiones y capturas de carbono del sector UTCUTS.

La información y datos de insumo para el modelo corresponden a los usos y cambios de usos de suelo provenientes de las Matrices de Cambio y Uso de Suelo Regional (MCUSR) estimadas y los parámetros que varían según zona, especie y tipo de uso de suelo. Estos últimos se detallan en el proceso de cálculo que se explica a continuación.

En el modelo de balance de carbono, es fundamental considerar la clasificación de los usos de suelo según su edad, independientemente del subtipo específico (por ejemplo, asentamiento, *Pinus radiata*, etc.). Los usos de suelo se clasifican como “Tierras que Permanecen como Tal” (TPT) cuando alcanzan una edad de 20 años. Por otro lado, las tierras con edades entre 1 y 19 años se definen como "Tierras en Transición"(TT), y las tierras que experimentaron un cambio de uso de suelo en el año en curso (edad 0 años) se denominan “Tierras en Transición Reciente” (TTR). Esta clasificación obedece al criterio del IPCC, que considera las tierras menores a 20 años como tierras en cambio, debido a que durante este periodo el uso de suelo se está estableciendo. Por ejemplo, las tierras forestales acumulan materia orgánica muerta (MOM) únicamente durante este periodo de transición (IPCC, 2006).

El modelo se enfoca en el cálculo de los flujos de los distintos depósitos de carbono, especialmente los cambios en las existencias de carbono en biomasa, ΔC_B . Para las “Tierras que Permanecen como Tal” (TPT), se estima ΔC_B utilizando la ecuación 3.9, que considera dos términos relevantes: las ganancias y pérdidas de carbono por biomasa (ΔC_G y ΔC_L , respectivamente). La ecuación 3.9 representa el balance de carbono en biomasa y se aplica a usos de suelo en tierras forestales, tanto para plantaciones forestales como para bosques nativos.

$$\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L \quad (3.9)$$

Donde:

ΔC_B : Balance anual de carbono en biomasa [*tonC/año*]

ΔC_G : Incremento anual de las existencias de carbono en biomasa [*tonC/año*]

ΔC_L : Pérdida de biomasa [*tonC/año*]

Cabe destacar que, para las TF, es necesario determinar las ganancias y pérdidas de carbono por separado. No obstante, para otros tipos de usos de suelo, se asume que las pérdidas y ganancias de carbono están en equilibrio (SNI Chile, MMA, 2020). Por lo tanto, para las TPT con usos de suelo de TC, PZ, AS, HU y OT, se considera que $\Delta C_G - \Delta C_L = \Delta C_B = 0$.

Para calcular las ganancias de carbono en biomasa, ΔC_G , en las tierras forestales (TF), se aplica la ecuación 3.10. En esta ecuación, la ganancia ΔC_G se obtiene al multiplicar el área del uso de suelo, A_i , por el incremento anual promedio de biomasa por unidad de superficie, G_{Total_i} , y por la fracción de carbono, CF_i . La fracción de carbono representa el porcentaje de masa que corresponde

efectivamente al carbono, y los valores utilizados para cada especie se muestran en la Tabla 3.1.

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} (A_i \cdot G_{Total_i} \cdot CF_i) \quad (3.10)$$

Donde:

A_i : Área asociada al subtipo de uso de suelo i [ha]

G_{Total_i} : Incremento anual promedio de biomasa [ton.d.m./ha/año]

CF_i : Fracción de carbono del subtipo i [tonC/ton.d.m.]

Tabla 3.1: Fracción de carbono según tipo de tierra forestal. Fuente: MMA, 2021

Especies	Fracción de carbono CF
Bosque Nativo *	0,43
Plantaciones forestales **	0,47

El siguiente cálculo aborda los depósitos de biomasa aérea y subterránea. El incremento anual promedio de biomasa se determina utilizando la ecuación 3.11, que incorpora el factor $(1 + R)$ que permite incluir la biomasa subterránea a partir de una estimación de la biomasa aérea. El parámetro R representa la relación entre la biomasa subterránea y aérea, es decir, $(1 + R)$ indica el porcentaje de biomasa total en relación con la biomasa aérea. Así pues, el incremento anual promedio de biomasa por unidad de superficie, G_{Total_i} , se calcula multiplicando el incremento anual neto promedio, I_v , para un tipo específico de vegetación (Tabla 3.2 para PF y Tabla 3.3 para BN) por la densidad promedio, D_i (Tabla 3.4), y ajustándolo con la relación entre biomasa subterránea y aérea, $(1 + R)$. El parámetro R varía por especie especie según la Tabla 3.5.

$$G_{Total_{i,j}} = \sum \{I_V \cdot D_i \cdot (1 + R)\} \quad (3.11)$$

Donde:

R : relación entre la biomasa subterránea y la aérea para un tipo específico de vegetación en ton d.m. de biomasa subterránea/ ton d.m. de biomasa aérea

I_V : incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica $m^3/ha/año$

D_i : Densidad promedio de la especie i [kg/m^3]

Tabla 3.2: Se muestra el incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica de las plantaciones forestales. Los valores están en [m³/ha/año]. Fuente: MMA, 2021

Especie/Región	ARI	TAR	ANT	ATA	COQ	VAL	MET	OHI	MAU	ÑUB	BIO	ARA	RIO	LAG	AIS	MAG
<i>Pinus radiata</i>						10	10	10,3	17,6	20,7	20,7	20,9	18,5	19,3		
Eucalyptus	8,1	8,1		8,1	11,3	12,3	12,2	12,8	19	24	24	21,3	21,8	22,7		
Prosopis	2,3	2,3	2,3	2,3	3,8	3,8	3,8									
Pseudotsuga menziesii									14	14	14	16	16	16	8,8	
Populus					25,5		25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	
Otras especies	3,6	3,6	3,6	3,6	5,5	7,3	7,3	9,1	10,9	12,7	12,7	12,7	14,5	14,5	18,2	9,1

Tabla 3.3: Se muestra el incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica en los Bosques Nativos. Los valores están en [m³/ha/año]. Fuente: MMA, 2021.

Especie BN	I_v [m ³ /ha/año]
<i>Alerce</i>	0,5
<i>Ciprés de las guaitecas</i>	3,9
<i>Araucaria</i>	4,6
<i>Ciprés de la cordillera</i>	5,0
<i>Lenga</i>	5,8
<i>Coihue de magallanes</i>	2,6
<i>Roble-Hualo</i> (Ro-Hua)	5,1
<i>Roble-Raulí-Coihue</i> (Ro-Ra-Co)	6,6
<i>Coihue-Raulí-Tepa</i>	5,8
<i>Esclerófilo</i>	1,5
<i>Siempreverde</i>	6,0

Tabla 3.4: Densidad básica según especie. Fuente: MMA, 2021.

Especie	Densidad básica [t/m ³]
<i>Pinus radiata</i>	0,39
<i>Eucalyptus globulus</i>	0,53
<i>Eucalyptus nitens</i>	0,45
<i>Prosopis chilensis</i> /P. tamarugo	0,79
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,36
<i>Populus spp.</i>	0,3
Especies nativas	0,5

Tabla 3.5: Factor R según especie. 1 El valor de “Otras especies” corresponde al promedio de *P. radiata*, *Eucaliptus* y *P. menziesii*. Fuente: MMA, 2021

Especie	Factor R
Especies Nativas	0,29
<i>Pinus radiata</i>	0,25
<i>Eucalyptus</i> spp.	0,22
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,28
Otras especies forestales ¹	0,25
Pastizales ARI-MAU	2,8
Pastizales ÑUB-LAG	4
Pastizales AIS-MAG	4

La pérdida de biomasa, ΔC_L , se estima utilizando la ecuación 3.12, en donde, se suma la pérdida anual de carbono en biomasa atribuible a la extracción de madera para consumo energético ($L_{madera-consumo}$) y las emisiones causadas por incendios ($L_{perturbaciones}$). Estas pérdidas se determinan utilizando las ecuaciones 3.13 y 3.14, respectivamente.

$$\Delta C_L = L_{madera-consumo} + L_{perturbaciones} \quad (3.12)$$

Para calcular $L_{madera-consumo}$, se multiplica el volumen anual de remoción de madera para consumo (FG) por la fracción de carbono (CF), la densidad (D) y el factor $(1 + R)$. En cuanto a $L_{perturbaciones}$, se obtiene multiplicando el área afectada por la perturbación (A) por la biomasa aérea promedio en tierras impactadas por perturbaciones (Bw), la fracción de carbono (CF), la fracción de biomasa perdida debido a la perturbación (fd , Tabla 3.9) y el factor $(1 + R)$. La Tabla 3.7 presenta la biomasa aérea promedio según el tipo de uso de suelo.

En el caso de plantaciones forestales, se tiene en cuenta la biomasa acumulada durante la edad de rotación (Tabla 3.6). Para los bosques nativos, se considera el volumen promedio por región (Tabla 3.8) y se convierte a $tonC/año$ empleando los parámetros correspondientes (D , R y CF).

$$L_{madera-consumo} = CF \cdot FG \cdot D \cdot (1 + R) \quad (3.13)$$

Donde:

FG : Volumen anual de remoción de madera para el consumo [$m^3/año$]

$$L_{\text{perturbación}} = A_{\text{perturbación}} \cdot B_W \cdot (1 + R) \cdot CF \cdot fd \quad (3.14)$$

Donde:

$A_{\text{perturbación}}$: Área correspondiente al incendio. [ha]

B_W : Biomasa aérea promedio de superficies de tierra afectadas por perturbaciones [ton.d.m./ha]

fd : Fracción de biomasa perdida por perturbaciones [–]

Tabla 3.6: Edad de rotación según especie. Fuente: MMA, 2021.

Especie	Rotación [años]
<i>Pinus radiata</i>	20
<i>Eucalyptus globulus</i>	11
<i>Eucalyptus nitens</i>	13
<i>Prosopis chilensis</i> ; <i>Prosopis tamarugo</i>	60
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	35
<i>Populus spp.</i>	15
Otras especies	35

Tabla 3.7: Biomasa acumulada antes de la conversión por tipo de uso de suelo. Fuente: MMA, 2021

Tipo de uso de suelo	Biomasa acumulada antes de la conversión B_w [t/ha]
Tierras de cultivo	10
Pastizales ARI-MAU	1,6
Pastizales ÑUB-LAG	2,7
Pastizales AIS-MAG	2,4
Humedales	s/i
Asentamientos	2
Otras Tierras	0

Tabla 3.8: Existencia promedio de volumen de Bosques Nativos por unidad de superficie. *El valor de Ñuble fue calculado como el promedio de Maule y Biobío Fuente: MMA, 2021)

Región	Existencia promedio volumen BN [m^3/ha]
Arica y Parinacota	10,4
Tarapacá	10,4
Antofagasta	10,4
Atacama	10,4
Coquimbo	28,8
Valparaíso	21,2
Metropolitana	28,2
O'Higgins	36,4
Maule	92,5
Ñuble *	132,55
Biobío	172,6
Araucanía	290,6
Los Ríos	357,4
Los Lagos	265,4
Aisén	266,3
Magallanes	248,2

Tabla 3.9: Fracción de biomasa pérdida por perturbaciones según tipo de tierra forestal. Fuente: MMA, 2021. * Valor proporcionado por CORMA para los incendios de ese año (MMA, 2021).

Especies	Factor fd
Bosque Nativo	0,43
Plantaciones forestales	0,47
Bosque Nativo 2017 *	0,39

Para calcular el balance de biomasa en tierras que experimentaron cambios en su uso de suelo, se emplea la ecuación 3.15. A diferencia de la ecuación 3.9, esta incluye el término $\Delta C_{conversión}$, que representa las emisiones resultantes del cambio en las existencias de carbono en la biomasa debido a la conversión de tierras a otro subtipo de uso de suelo. El término $\Delta C_{conversión}$ se calcula utilizando la ecuación 3.16.

En el caso de las tierras forestales, se consideran tanto ΔC_G como ΔC_L para estimar el balance de biomasa. Sin embargo, para otros tipos de uso de suelo,

aunque se asume que $\Delta C_G - \Delta C_L = 0$, no es posible suponer que $\Delta_{conversión}$ sea cero y por lo tanto debe estimarse también según la ecuación 3.16.

$$\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{conversión} - \Delta C_L \quad (3.15)$$

$$\Delta C_{conversión} = \sum_i (B_{DESPUÉS_i} - B_{ANTES_i}) \cdot \Delta A_{cambio} \cdot CF \quad (3.16)$$

Donde: $B_{DESPUÉS_i}$: Biomasa inmediatamente después del cambio de uso de suelo [$ton.d.m./ha$] B_{ANTES_i} : Biomasa inmediatamente antes del cambio de uso de suelo [$ton.d.m./ha$] A_{cambio} : Áreas de cambio de uso de suelo [ha]

Aunque la ecuación considera la biomasa antes y después de la conversión, es importante mencionar que en los cálculos reportados en Chile se asume que la biomasa justo después de la conversión es nula puesto que se remueve todo antes de hacer algún cambio de uso de suelo (MMA, 2020).

Para estimar los cambios en el depósito de materia orgánica muerta (MOM), se asume que, en las TPT que el depósito se encuentra en equilibrio con el sistema, es decir, no hay variaciones. No obstante, cuando ocurren cambios en el uso de suelo, se utiliza la ecuación 3.17, ya que la MOM se remueve y se emite durante la conversión. Para tierras distintas a los BN, se asume que las existencias de carbono en MOM son nulas debido a los altos niveles de manejo de estos tipos de uso de suelo. En el caso de los Bosques Nativos, se emplean los valores presentados en las Tablas 3.10 y 3.11, correspondientes a madera muerta y hojarasca, respectivamente.

Es importante destacar que si un Bosque Nativo es removido, la MOM se emite por completo en el año en que se realiza el cambio, es decir, $T_{on} = 1$. Por otro lado, si se remueve otro tipo de uso de suelo y se sustituye por Bosque Nativo, la MOM se acumulará durante 20 años, por lo que $T_{on} = 20$.

$$\Delta C_{DOM} = \frac{(C_n - C_o \cdot A_{on})}{T_{on}} \quad (3.17)$$

Donde:

C_n : Existencia de madera muerta/hojarasca, bajo la nueva categoría de uso de la tierra [$tonC/año$]

C_o : Existencia de madera muerta/hojarasca, bajo la categoría anterior de uso de la tierra

A_{on} : Superficie sometida a la conversión de la vieja a la nueva categoría de uso

de la tierra [ha]

T_{on} : Tiempo en el que se produce la transición a la nueva categoría de uso de la tierra [año]

Tabla 3.10: Carbono total por madera muerta según especie. *Sin información, se toma el valor promedio. (INFOR,2020).

Especie BN	Carbono madera muerta [t/ha]
<i>Alerce</i>	121,4
* <i>Ciprés de las guaitecas</i>	80,9
<i>Araucaria</i>	133,4
* <i>Ciprés de la cordillera</i>	80,9
<i>Lenga</i>	43,4
<i>Coihue de magallanes</i>	140,1
<i>Roble-Raulí-Coihue</i>	52,9
<i>Coihue-Raulí-Tepa</i>	74,4
<i>Esclerófilo</i>	16,7
<i>Siempreverde</i>	64,8

Tabla 3.11: Carbono retenido en hojarasca según la región (IPCC, 2006).

Región	Carbono hojarasca [t/ha]
Arica a Ñuble	28,2
Biobío a Los Lagos	13,0
Aisén a Magallanes	16,0

El modelo utiliza una estructura de datos que muestra la superficie de uso de suelo para los tres tipos, TPT, TT y TTR. Para esto se genera una estructura tipo cubo que tiene en sus dimensiones el uso de suelo actual, su uso de suelo anterior y la edad (con un tope de 20 años). Para iniciar el modelo es necesario contar con 20 años de información hacia atrás por lo que en la condición de borde (año inicial, 1990 en este caso) se asume que la matriz de cambio y uso de suelo regional se repite 20 años hacia atrás con la restricción de que no se pueden tener usos de suelo negativos. Para cada año siguiente la estructura de datos se actualiza aumentando en uno la edad de las superficies y acumulando las superficies que llegan a 20 años. Las superficies que cambian de uso de suelo son descontadas a las TPT (tierras con 20 años o más) al subtipo asociado al año anterior según indique la MCUS. A estas tierras se les asigna edad cero.

Para la proyección, se contempla un escenario de tipo “business as usual” (BAU) en cada región, asumiendo que la última tendencia se corresponde con la tasa de cambio y uso de suelo más reciente. Para ello, se toman en cuenta las variaciones ocurridas en los últimos 3 años del período analizado. Debido a la naturaleza de los datos proporcionados por la CONAF, las tres matrices de uso de suelo de los últimos años resultan equivalentes. Por lo tanto, la última tasa de cambio entre subtipos de usos de suelo corresponde a la matriz de cambio y uso de suelo regional más reciente.

Respecto a los incendios forestales se consideró en el escenario BAU el promedio de los últimos 4 años con información (2018 - 2021) y para el consumo se consideró el mismo que el último año con información (2018).

Con el objetivo de generar las proyecciones de los usos de suelo para cada región, se emplea la última matriz de cambio y uso de suelo para estimar los años siguientes. Este proceso está sujeto a ciertas restricciones: no se permiten superficies negativas y los totales por subtipo en las MCUSR deben ser consistentes entre los años. Esto implica que, para cada subtipo, el total “actual” del año anterior debe ser igual al total “anterior” del año siguiente en cada MCUSR.

Finalmente, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad modificando la matriz de cambio y uso de suelo más reciente, la cual se utiliza para proyectar el periodo futuro. Los parámetros que se ajustan corresponden a los cambios en los usos de suelo, es decir, los valores que se encuentran fuera de la diagonal de la MCUSR. Este ajuste se ilustra en el proceso descrito en la ecuación 3.18. Se plantean dos escenarios adicionales: el primero incrementa las tasas de cambio en los usos de suelo (a_{ij}) en un 50 %, mientras que el segundo las reduce en un 50 %.

$$\begin{array}{ccc}
 & t_1 & \dots & t_n \\
 t_1 & \left[\begin{array}{cc} a_{11} & a_{1j} \end{array} \right] & & \\
 \vdots & & \dots & \\
 t_n & \left[\begin{array}{cc} a_{ij} & a_{nn} \end{array} \right] & &
 \end{array}
 \rightarrow
 \begin{array}{ccc}
 & t_1 & \dots & t_n \\
 t_1 & \left[\begin{array}{cc} s_{11} & s_{1j} \end{array} \right] & & \\
 \vdots & & \dots & \\
 t_n & \left[\begin{array}{cc} s_{ij} & s_{nn} \end{array} \right] & &
 \end{array}
 \quad (3.18)$$

Donde:

$i, j \in [1, \dots, n]$: Tipos y subtipos de usos de suelo de la región.

s_{ij} : Cambio de uso de suelo escenario s . Con $s_{ij} = a_i \cdot p_s$.

p_s : Proporción escenario s .

Caso +50 % $\rightarrow p_s = 0,5$. Caso -50 % $\rightarrow p_s = 1,5$.

$s_i = s_{ii}$: Superficie que no cambia, escenario s ($TPT + TT$).

Capítulo 4

Resultados

4.1. Uso de suelo regional y nacional

A partir de los datos detallados de usos de suelo hasta 2018 y las series nacionales de cambio de uso de suelo (MCUSN), se resolvieron ambos problemas de optimización descritos en la metodología, generando con esto, las MCUSR para el período de estudio (1990 y 2018). Durante el primer proceso de optimización, se identificó un error sistemático de 0,35 [ha] en todos los años analizados. Este error se atribuye a discrepancias en los datos de origen. Al comparar el total nacional obtenido con los totales regionales (CONAF, 2018) con el total nacional a partir de las clasificaciones de usos de suelo por tipos (CONAF, 2022), estos difieren en exactamente en 0,35 [ha]. Aunque este error representa aproximadamente $4,6 \cdot 10^{-7} \%$ de la superficie total de Chile y es prácticamente despreciable para efectos de esta memoria de titulación, se menciona para garantizar la transparencia y validez de los resultados.

A fin de evaluar la validez de estos resultados, se calcularon los errores de cierre total de los problemas de optimización para cada región, presentados en la Tabla 4.1.

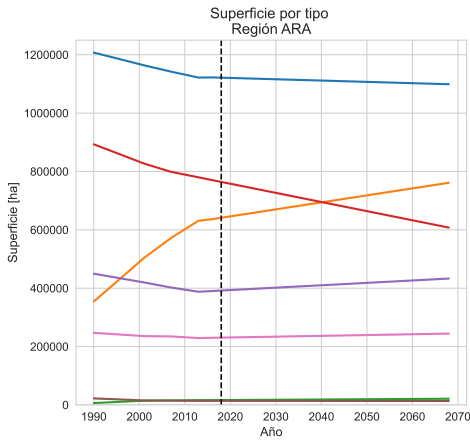
El mayor error promedio observado es de 0,06 %, lo que indica que las MCUSR representan una solución factible en el marco de los problemas de optimización planteados. Los resultados obtenidos se encuentran disponibles en un anexo digital, el cual puede ser descargado desde el repositorio de la Universidad de Chile (ver Anexo B).

Tabla 4.1: Errores finales promedio para cada región en el proceso de optimización para la obtención de las matrices de cambio y uso de suelo regionales.

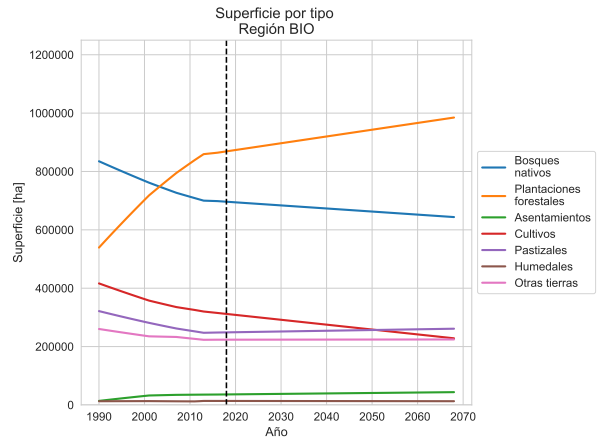
Región	Superficie	Error Promedio [ha]	%
Arica	1694479,6	56,9	0,00 %
Tarapacá	4228804,2	165,1	0,00 %
Antofagasta	12605964,0	492,0	0,00 %
Atacama	7563725,9	426,8	0,01 %
Coquimbo	4061627,7	57,2	0,00 %
Valparaíso	1598766,6	2,4	0,00 %
Metropolitana	1539631,1	1,0	0,00 %
O'Higgins	1634437,0	160,8	0,01 %
Maule	3030764,8	1787,6	0,06 %
Ñuble	1310237,9	376,7	0,03 %
Biobío	2399067,7	715,4	0,03 %
La Araucanía	3180347,8	366,9	0,01 %
Los Ríos	1834964,6	257,1	0,01 %
Los Lagos	4840836,1	677,8	0,01 %
Aysén	10736056,8	1249,7	0,01 %
Magallanes	13469451,4	9,1	0,00 %

En la Figura 4.2 se presentan los cambios en los usos de suelo en las seis regiones con mayores variaciones a lo largo del tiempo: Araucanía, Biobío, Maule, Ñuble, O'Higgins y Los Ríos. La Figura se divide en dos partes mediante una línea horizontal negra punteada: a la izquierda se muestra la serie histórica obtenida del proceso de optimización, y a la derecha se presenta el escenario BAU, que considera la última pendiente observada en la serie histórica como la tendencia futura.

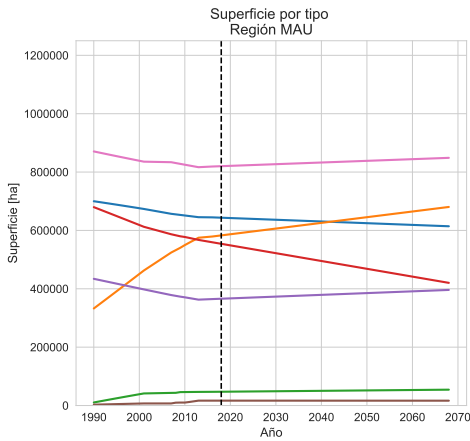
En todas las regiones, se observa un incremento en las plantaciones forestales y una disminución de los bosques nativos y cultivos. En las regiones de Biobío y Ñuble, las plantaciones forestales superan a los bosques nativos en la serie histórica, mientras que en la región del Maule esto ocurre en el escenario BAU proyectado. Las tierras forestales sobrepasan a los cultivos en la serie histórica de la región del Maule y al final de la serie histórica en la región de Ñuble.



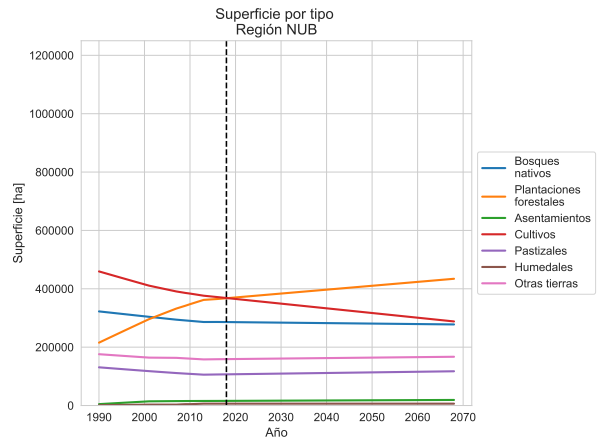
(a) Región de la Araucanía



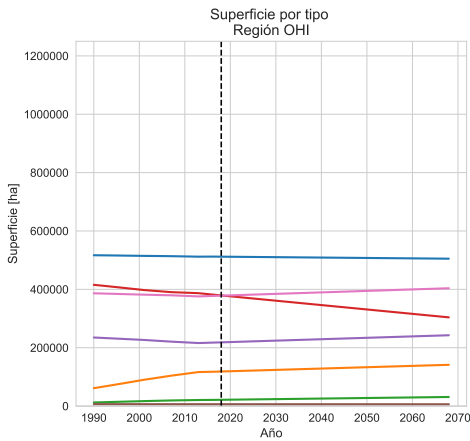
(b) Región del Biobío



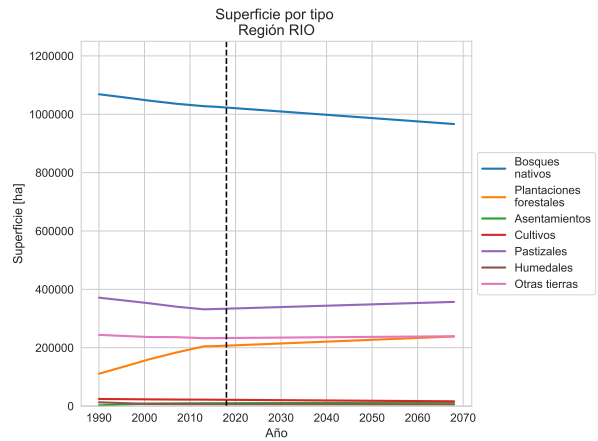
(c) Región del Maule



(d) Región de Ñuble



(e) Región de O'Higgins



(f) Región de los Ríos

Figura 4.1: Superficie total que se tiene por cada tipo de uso de suelo en diferentes regiones de Chile. Se clasifica en Bosques Nativos, Plantaciones Forestales, Asentamientos, Tierras de Cultivo, Pastizales, Humedales y Otras Tierras.

Además, se destaca un aumento de más de 200.000 ha en plantaciones forestales en las regiones de Araucanía, Maule y Biobío. Por otro lado, hay una disminución de más de 100.000 ha en cultivos en las regiones de Araucanía, Maule, Ñuble y Biobío. Las regiones en las que los bosques nativos disminuyen en más de 100.000 ha son Araucanía y Biobío.

En cuanto a los pastizales, se observa un descenso general durante la serie histórica. Sin embargo, en todas las regiones se presenta un cambio de pendiente al final de la serie, lo que resulta en pendientes positivas para los pastizales en el escenario BAU. En general, los asentamientos también muestran un aumento en todas las regiones analizadas.

Con base en las matrices de cambio y uso de suelo regionales, se generaron series de tiempo para los distintos tipos de uso de suelo en todas las regiones. A estas series de tiempo se les aplicó el test de Mann-Kendall, con el objetivo de identificar tendencias en los cambios de uso de suelo. Los resultados de estas tendencias se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Tendencias según el test de Mann-Kendall. La flecha hacia arriba, \uparrow , señala una tendencia al crecimiento. La flecha hacia abajo, \downarrow , una tendencia al decrecimiento. Las letras representan si el cambio es significativo (S) o no es significativo (N).

Región	Bosques nativos		Plantaciones forestales		Asentamientos		Cultivos		Pastizales		Humedales		Otras tierras	
Aysén	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S
Antofagasta	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	-	N	\downarrow	S	\downarrow	S
Araucanía	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S
Arica y parinacota	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	-	N
Atacama	-	N	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	-	N	\downarrow	S	-	N
Biobío	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	-	N	\downarrow	S	-	N
Coquimbo	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	-	N
Los Lagos	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S
Magallanes	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S
Maule	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	-	N	\uparrow	S
Metropolitana	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S
Ñuble	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	-	N	\uparrow	S
O'Higgins	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S
Los Ríos	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S
Tarapacá	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	-	N	\downarrow	S	\downarrow	S
Valparaíso	\downarrow	S	\uparrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S	\downarrow	S	\uparrow	S

Las tendencias observadas en general son significativas para la mayoría de los tipos de uso de suelo, con algunas excepciones en casos específicos como pastizales y otras tierras en las regiones de Atacama, Biobío, y Valparaíso, así como humedales en Maule y Ñuble.

De acuerdo con la Tabla 4.2, en la mayoría de las regiones se observa una tendencia al decrecimiento de los bosques nativos y una tendencia al crecimiento de las plantaciones forestales, asentamientos y cultivos. En cambio, los pastizales y humedales presentan una tendencia mixta, en algunos casos creciente y en otros decreciente. Por otro lado, las tendencias de las otras tierras varían según la región.

La significancia de estas tendencias se evalúa a través del p-valor, que indica la probabilidad de rechazar incorrectamente la hipótesis nula (ausencia de tendencia). Cuando el p-valor es inferior al umbral estándar (alfa = 0.05), se considera que la tendencia es significativa.

La Tabla 4.3 muestra las variaciones promedio de superficie en [ha/año] (hectáreas por año) para cada tipo de uso de suelo en cada región. Se destaca el notable aumento en plantaciones forestales (PF) en las regiones de Maule, Ñuble y Biobío, con tasas promedio de 4460,1 [ha/año], 2807,1 [ha/año] y 5713,6 [ha/año], respectivamente. Por otro lado, se observa una disminución en tierras de cultivo (TC) en las regiones de O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío, con -1429,9 [ha/año], -3327,1 [ha/año], -2198,6 [ha/año] y -2412,4 [ha/año] respectivamente.

Tabla 4.3: Variación promedio de superficie en [ha/año] para cada tipo de uso de suelo en cada región durante el periodo 1990 - 2018.

Región	BN	PF	AS	TC	PZ	HU	OT
Arica	-51,0	1,5	73,2	-53,5	-97,4	-37,1	164,4
Tarapacá	-43,2	180,8	413,7	-26,0	-486,9	-19,9	-18,4
Antofagasta	-16,6	40,3	1609,3	19,7	-1489,1	-81,0	-82,6
Atacama	12,4	13,8	354,7	-179,4	-1062,9	-16,6	877,9
Coquimbo	-48,9	114,4	322,4	-768,4	126,1	-18,7	273,0
Valparaíso	-351,3	533,9	411,8	-689,5	43,0	-12,6	64,6
Metropolitana	-260,3	71,2	936,7	-853,1	38,2	-15,8	83,1
O'Higgins	-151,6	1025,9	240,7	-1429,9	98,7	-6,1	222,2
Maule	-1099,9	4460,1	562,1	-3327,1	-488,0	174,6	-281,8
Ñuble	-573,0	2807,1	183,7	-2198,6	-173,8	67,3	-112,7
Biobío	-2452,5	5713,6	384,5	-2412,4	-774,0	0,8	-460,0
La Araucanía	-1387,6	5216,4	189,3	-3657,0	-213,8	-113,6	-33,7
Los Ríos	-1308,2	1634,3	115,9	-103,3	-186,2	-92,4	-60,1
Los Lagos	-1443,0	794,9	111,4	-50,1	197,2	-58,2	447,7
Aysén	-2257,7	229,4	19,9	-25,7	467,2	-110,3	1677,2
Magallanes	-1795,2	20,3	161,9	-178,4	1370,9	-632,7	1053,2

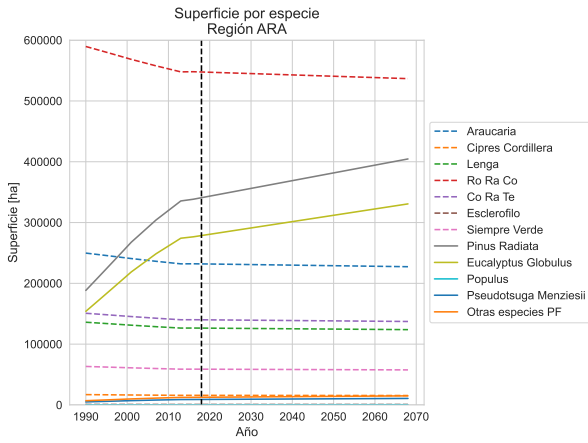
En términos de asentamientos (AS), las regiones de Antofagasta y Metropolitana experimentan un crecimiento considerable, con 1609,3 [ha/año] y 936,7 [ha/año], respectivamente. La región de Aisén muestra un aumento en pastizales (PZ) de 467,2 [ha/año], mientras que la región de Magallanes presenta un incremento en otras tierras (OT) de 1053,2 [ha/año].

Es relevante considerar estos cambios en las superficies de los distintos tipos de uso de suelo al analizar y proyectar las emisiones de gases de efecto invernadero, así como para diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Estas variaciones pueden tener impactos significativos en la capacidad de absorción de carbono y la vulnerabilidad de los ecosistemas a eventos extremos como incendios forestales o sequías.

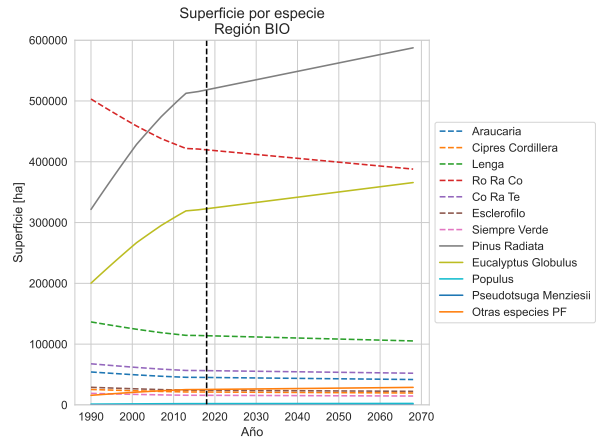
Dado que las tierras forestales tienen un mayor impacto en el balance de GEI, es relevante analizar el detalle por especie de las plantaciones forestales. La Figura 4.2 muestra la superficie total por especie en diferentes regiones de Chile, donde se resalta el aumento de *Pinus radiata* y *Eucalyptus*. Además, en dicha Figura se puede observar el descenso en los bosques nativos y el aumento de las plantaciones forestales en las regiones de la Araucanía, Biobío, Maule, Ñuble, O'Higgins y Los Ríos.

Estas tendencias en la composición de especies en las plantaciones forestales podrían tener implicaciones en la capacidad de captura de carbono, la resistencia a eventos extremos como incendios forestales y la biodiversidad en las distintas regiones. Por lo tanto, es esencial considerar estos cambios al diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, así como al evaluar el impacto de las políticas forestales en las emisiones de GEI y el medio ambiente.

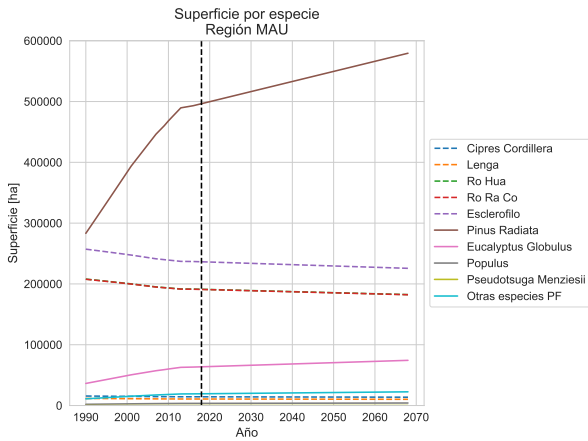
Finalmente, la Figura 4.3 ilustra los usos de suelo a nivel nacional según los diferentes tipos de uso, incluyendo Bosques Nativos (BN), Plantaciones Forestales (PF), Asentamientos (AS), Tierras de Cultivos (TC), Pastizales (PZ), Humedales (HU) y Otras Tierras (OT). La Figura compara los datos históricos con la proyección del caso base. En ella, se puede observar un aumento en las plantaciones forestales, lo cual coincide con una disminución en otros usos de suelo, especialmente en los bosques nativos y tierras de cultivo.



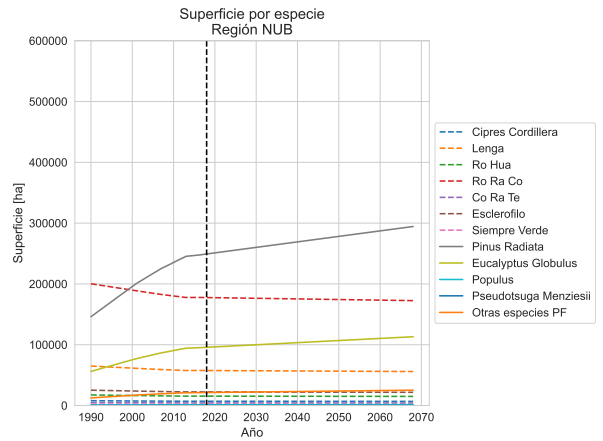
(a) Región de la Araucanía



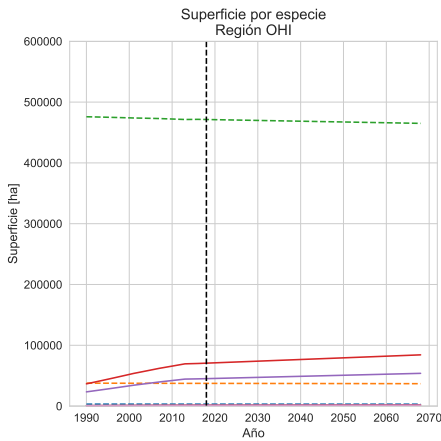
(b) Región del Biobío



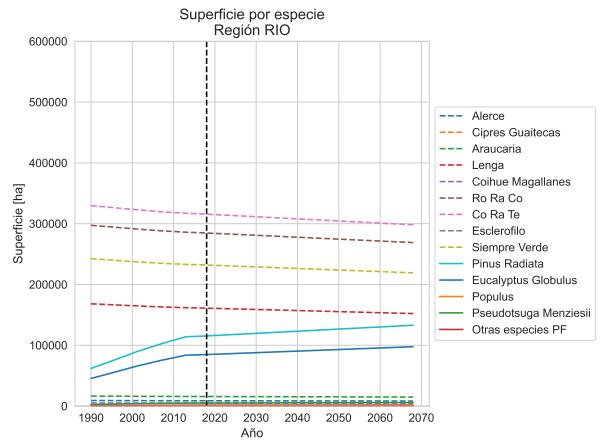
(c) Región del Maule



(d) Región de Ñuble



(e) Región de O'Higgins



(f) Región de los Ríos

Figura 4.2: Superficie total que se tiene por especie en diferentes regiones de Chile.

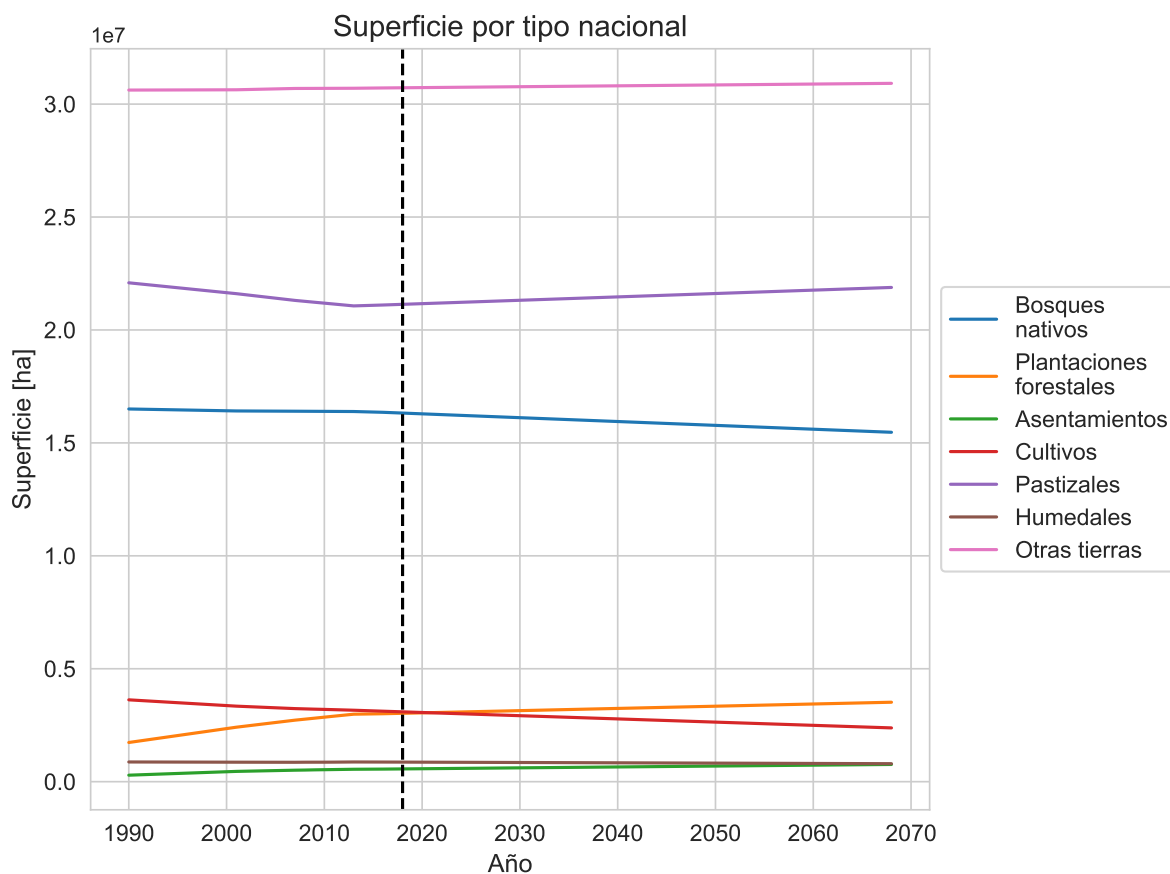


Figura 4.3: Usos de suelo totales nacionales. La línea negra divide la serie histórica de las proyecciones.

Los resultados de las series de tiempo regionales y nacionales son consistentes con las tendencias globales y nacionales previamente mencionadas en los antecedentes, incluido el crecimiento constante de la industria forestal en Chile, especialmente en las regiones del sur (Hofflinger, 2021). El aumento de la superficie de plantaciones forestales en Chile se corrobora con datos de la plataforma “Estadísticas Forestales” del INFOR (Instituto Forestal), que muestra un crecimiento promedio de 17.832 [ha/año] en la región de la Araucanía y 40.548 [ha/año] en la región del Biobío (INFOR, 2023).

4.2. Balance de carbono sector UTCUTS

La Figura 4.4 muestra una comparación entre los resultados del modelo desarrollado y los datos proporcionados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) mediante un gráfico de dispersión. En el eje X, se encuentran los valores del MMA, mientras que en el eje Y se ubican los valores del modelo. Cada punto representa una categoría o subcategoría del balance de biomasa reporta-

do al IPCC por el MMA. Se incluye una línea 1v1, que representa la igualdad entre los valores del MMA y del modelo.

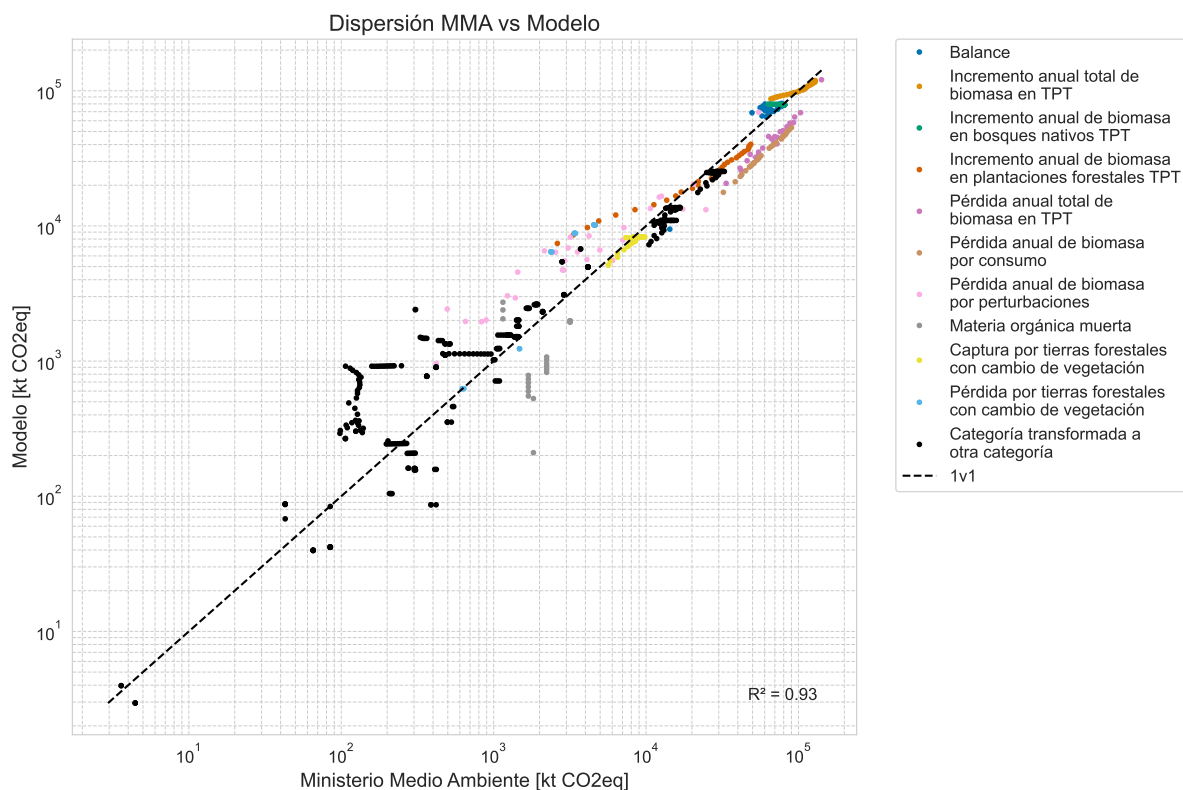


Figura 4.4: Gráfico de dispersión entre el modelo y el Ministerio de medio ambiente para los resultados de las subcategorías del inventario.

Se observa que las categorías de órdenes superiores, que son de mayor relevancia en este estudio, ajustan mejor a la línea 1v1, especialmente en el caso del balance, incremento anual de biomasa total y bosques nativos. La categoría de mayor relevancia para el presente trabajo es, sin duda, la referente al balance de carbono, puesto que esta será proyectada en el escenario BAU.

Las diferencias entre los resultados del modelo y los datos del MMA pueden deberse a varias razones. En primer lugar, la desagregación del MMA de los usos de suelo por región (MCUSR) no está reportada y no se pudo obtener mediante la Ley de Transparencia (BCN, 2008). Además, existen diferencias en los supuestos entre el MMA y el modelo, lo que podría causar discrepancias sistemáticas. Por ejemplo, el modelo requiere 20 años de información previa para asignar el crecimiento de biomasa a tierras en transición, lo que implica supuestos diferentes en los primeros años debido a la falta de información reportada por el MMA.

Otra posible razón es la variación en los tiempos de desarrollo de biomasa para tierras en cambio, ya que esta información no está especificada en el reporte del MMA. Existen diferentes opciones para determinar estos tiempos, como asumir un tiempo estándar de 20 años, utilizar el tiempo de rotación de las especies, o distribuir proporcionalmente según la edad que tiene la tierra en cuestión, pues al realizar el cambio de uso de suelo se puede considerar que el cambio de una tierra que permanece como tal o una tierra en transición (menor a 20 años). En el modelo desarrollado, se consideró el tiempo de rotación como un supuesto. Además, algunas categorías más pequeñas no fueron calculadas en el modelo debido a su menor orden de magnitud, lo que podría generar desplazamientos en estas categorías sin afectar significativamente las categorías más grandes.

El coeficiente de determinación (R^2) obtenido en esta comparación es de 0,93, lo que indica una alta correlación entre los valores del modelo y los proporcionados por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Este resultado sugiere que el modelo es capaz de replicar adecuadamente los resultados proporcionados por el MMA, especialmente en las categorías de mayores órdenes de magnitud. Es importante destacar que el R^2 se calculó sobre el logaritmo de los valores, con el fin de darle la misma importancia a las variables de órdenes menores en la comparación. De esta forma, se evita que las diferencias en magnitud entre las variables afecten el resultado del R^2 . Además, el R^2 se calcula sobre la curva 1v1, lo que refleja la relación directa en la evaluación entre los valores del MMA y los del modelo.

La Figura 4.5 presenta una comparación entre las series temporales anuales del balance de carbono del sector UTCUTS según el modelo desarrollado y los resultados del Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Además, se muestra la diferencia entre ambos conjuntos de resultados. En general, los valores del balance del modelo son mayores que los del MMA, con un %bias de 10,22 %. Este indicador representa la diferencia relativa promedio entre el modelo y los datos del MMA, lo que implica que los resultados del modelo presentan un 10,22 % menos de capturas de carbono en promedio respecto a los valores del MMA, es decir, el balance es mayor en el modelo.

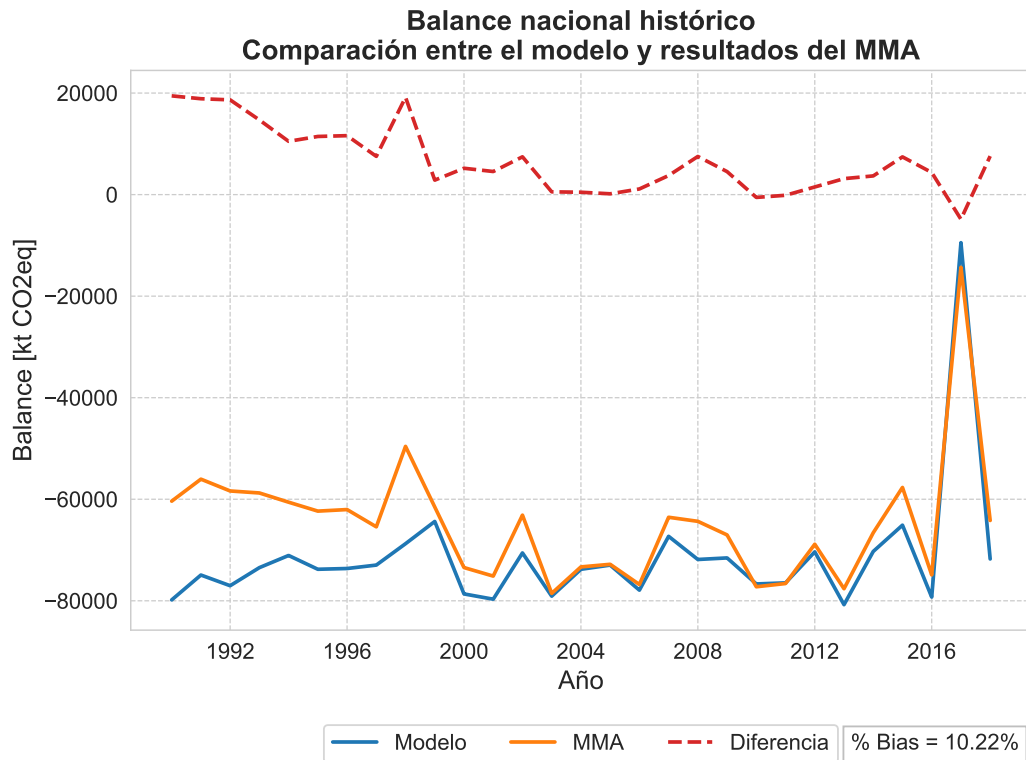


Figura 4.5: Comparación de los resultados del balance total de carbono para el sector UTCUTS entre el modelo y el Ministerio de Medio Ambiente.

La diferencia promedio entre los resultados del modelo y los del MMA es de 6.000 [ktCO₂eq], lo que indica que los resultados del modelo difieren en promedio por esta cantidad respecto a los valores del MMA. En general, tanto los resultados del modelo como los del MMA se encuentran en el orden de -70.000 [ktCO₂eq] (capturas), aunque con cierta variabilidad en los datos debida a las perturbaciones.

Las magnitudes y órdenes del balance se deben principalmente a los usos y a los cambios en los usos de suelo, los cuales pueden generar cambios sutiles en las pendientes de las captaciones. Sin embargo, un incendio forestal es una perturbación que puede producir una discontinuidad en la emisión de gases de efecto invernadero, generando un ruido considerable en el balance de GEI. En particular, los incendios forestales son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero en Chile, y su frecuencia e intensidad se han visto aumentadas en los últimos años (CONAF, 2017).

En 2017, se observa un pico importante que reduce las capturas a aproximadamente -10.000 [ktCO₂eq]. Este año fue particularmente devastador en términos

de incendios forestales, con un total de 588.428 hectáreas afectadas (CONAF, 2017). La magnitud de las emisiones reportadas por estos incendios depende en gran medida del factor fd , que determina qué porcentaje de la biomasa quemada se emite directamente a la atmósfera. El Ministerio del Medio Ambiente de Chile ha determinado valores específicos de fd para cada uso de suelo, en particular las tierras forestales tienen un fd de 0,74, pero se justifica para el año 2017 un valor diferente para las Tierras Forestales de 0,36, reduciendo las emisiones reportadas a la mitad respecto al factor utilizado en condiciones normales.

La diferencia entre los resultados del modelo y los del MMA es más pronunciada en los primeros años del análisis (1990 y 1998), lo que podría atribuirse al supuesto empleado para las Matrices de Cambios de Uso de Suelo (MCUS) en los 20 años previos al primer año de estudio. Es posible que, después de un período de ajuste inicial, el modelo alcance un estado de mayor estabilidad en sus estimaciones, lo que podría explicar la disminución de las diferencias en los años posteriores. Esta estabilización en el modelo sugiere que, a medida que se incorpora más información histórica, las proyecciones se vuelven más precisas y confiables.

Para evaluar la concordancia entre las clasificaciones de capturas y emisiones reportadas al IPCC por el MMA y los resultados de estas clasificaciones en el modelo, se utiliza una matriz de confusión (ver Figura 4.6). En esta matriz, un signo positivo corresponde a emisiones, mientras que un signo negativo representa capturas de gases de efecto invernadero. La matriz de confusión permite identificar las coincidencias y discrepancias entre ambos conjuntos de datos en términos de clasificaciones de emisiones y capturas.

De acuerdo con la matriz de confusión, se observa que existen 0 falsos positivos y 38 falsos negativos. Además, se registran 368 coincidencias como emisión y 522 coincidencias como captura. La interpretación de estos resultados sugiere que, en general, la clasificación de emisiones y capturas en el modelo y los datos del MMA coinciden en su mayoría, aunque con algunas diferencias menores.

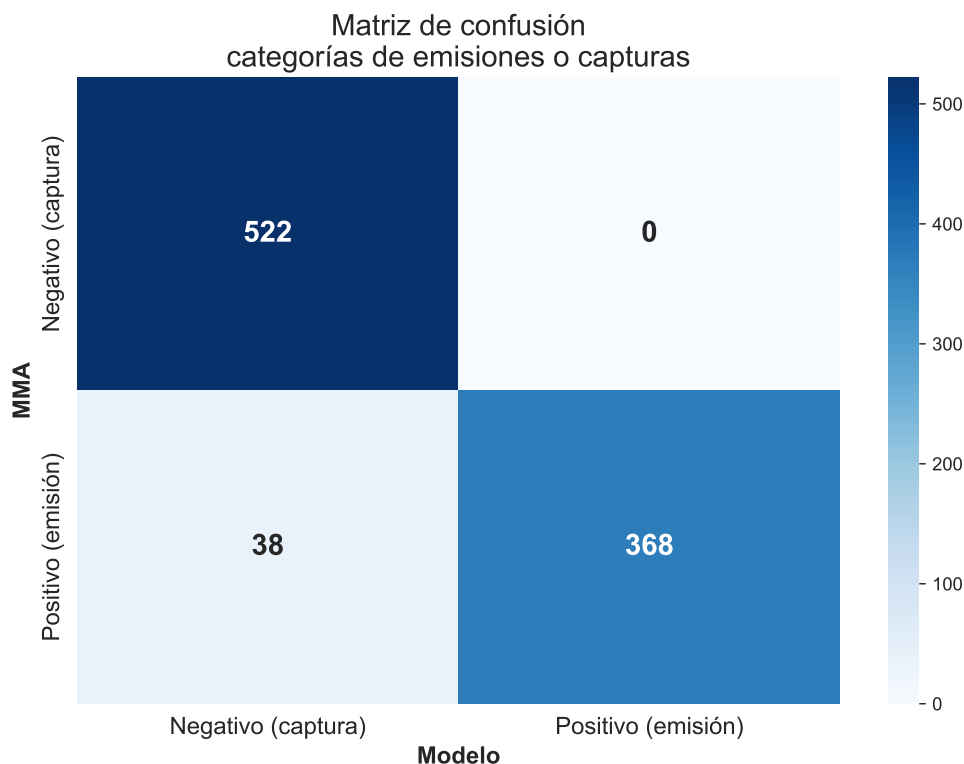


Figura 4.6: Matriz de confusión que muestra si los signos de los resultados de cada subcategoría del inventario estimado por el modelo y el Ministerio de Medio Ambiente coinciden o no.

La Tabla 4.4 muestra las tasas de falsos positivos y falsos negativos de la matriz de confusión:

Tabla 4.4: Tasas de falsos positivos y falsos negativos de la matriz de confusión que compara las clasificaciones entre capturas y emisión de ambos modelos.

Estadístico	Valor
Tasa de falsos positivos	4,09 %
Tasa de falsos negativos	0,00 %

Los resultados indican que la tasa de falsos positivos es del 4,09 %, mientras que la tasa de falsos negativos es del 0,00 %. Esto indica que el modelo tiende a clasificar correctamente las capturas, pero puede sobrestimar ligeramente las emisiones en comparación con los datos del MMA.

4.3. Proyecciones sector UTCUTS

En la Figura 4.7, se presenta el balance de GEI del sector UTCUTS estimado con el modelo durante el período de evaluación (1990-2018) en conjunto a la proyección futura (2019-2068). La gráfica muestra que el caso base (línea azul) se mantiene en un rango entre -60,000 y -70,000 kt CO_2eq . Además, en el análisis de sensibilidad donde se redujeron cambios de usos de suelo en un 50 % (línea naranja), se observa una mayor captura de carbono en comparación con el caso en el que se incrementaron las tasas de cambio de uso de suelo en un 50 % (línea verde).

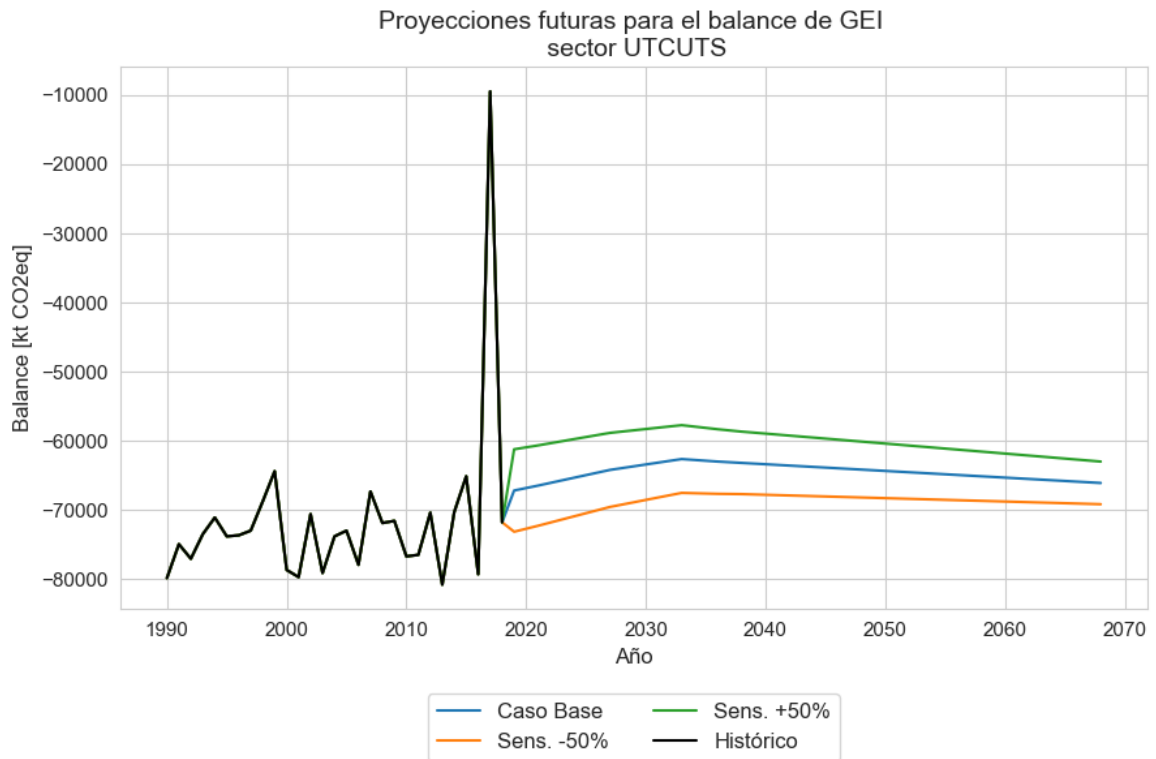


Figura 4.7: Proyecciones del balance de GEI del sector UTCUTS. Se realiza un análisis de sensibilidad respecto a las tendencias que determinan al caso base y se muestran las curvas para una sensibilidad del 50 % y del 150 %.

En el primer tramo de la gráfica (línea negra), se observa una mayor dispersión en las captaciones, atribuible principalmente al uso de datos de incendios forestales anuales para estimar las emisiones relacionadas. Lo anterior se muestra en la Tabla 4.5, en donde se tiene una desviación estándar de un orden de magnitud superior para la serie histórica (12482,8 [kt CO_2eq]), en comparación con las proyecciones que utilizan un promedio de las superficies incendiadas en

los últimos años (desviaciones de 1142,1 [ktCO₂eq], 1338,6 [ktCO₂eq] y 1482,9 [ktCO₂eq]), resultando en una menor variabilidad. Cabe destacar que la condición de sumidero del sector UTCUTS está sujeta a la ocurrencia de incendios forestales, como los ocurridos en Chile el año 2017 o en el presente año (2023).

Tabla 4.5: Estadísticas sobre el balance asociado a la serie histórica (1990 - 2018) y proyecciones (2019 - 2068).

Serie	Desviación estándar	Promedio	Mínimo	Máximo
	[ktCO ₂ eq]	[ktCO ₂ eq]	[ktCO ₂ eq]	[ktCO ₂ eq]
Historica	12482.8	-71497.5	-80767.3	-9464.0
Caso Base	1142.1	-64518.0	-67167.2	-62618.7
Sens. -50 %	1338.6	-68873.6	-73126.9	-67510.5
Sens. +50 %	1482.9	-60148.5	-62980.9	-57719.4

La Tabla 4.6 presenta los resultados del test de Mann-Kendall aplicado al análisis de sensibilidad sobre las tasas de cambio de uso de suelo. El test de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica que evalúa si existe una tendencia monótona en una serie de datos. La Tabla muestra los resultados para diferentes series de datos, tanto históricas como proyectadas, considerando y no considerando la serie histórica.

Se observa que al incluir la serie histórica en el análisis de las proyecciones, se tienen tendencias significativas de aumento en los valores del balance (reducción de la capacidad de captura del sector). Sin embargo, al analizar solo las proyecciones sin la serie histórica, se observa una tendencia de descenso en el caso BAU y en la proyección con un aumento del 50 % en las tasas de cambio de uso de suelo. No se encuentra una tendencia significativa en el caso con una reducción del 50 % en las tasas de cambio de uso de suelo. Estos resultados sugieren que las proyecciones futuras del balance de carbono del sector pueden depender en gran medida de las tendencias históricas y del escenario considerado.

Tabla 4.6: Resultados test de Mann-Kendall para el análisis de sensibilidad. Se realiza el test a la serie histórica de forma independiente, y a los casos considerando y no considerando la serie histórica.

Serie	Significancia	Tendencia
Histórica	No significativa	Sin tendencia
Caso BAU + histórica	Significativa	Aumento
Sens. -50 % + histórica	Significativa	Aumento
Sens. +50 % + histórica	Significativa	Aumento
Caso BAU	Significativa	Descenso
Sens. -50 %	No significativa	Sin tendencia
Sens. +50 %	Significativa	Descenso

4.4. Análisis crítico de las proyecciones y compromisos de Chile

Respecto al balance en relación a los usos de suelo, es importante resaltar que los tipos de usos de suelo con mayor capacidad de capturar carbono son las plantaciones forestales y los bosques nativos. Aunque aumentar la superficie de plantaciones forestales puede ser una estrategia efectiva para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, también es crucial considerar los impactos negativos que pueden tener en el ecosistema. Por ejemplo, según un estudio de Paquette y Messier (2010), el incremento de plantaciones forestales puede causar daños en los ecosistemas, como la degradación del suelo, la disminución de la biodiversidad o la contaminación del agua. Estos impactos pueden generar emisiones adicionales de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, afectar la eficacia de la mitigación.

Por lo tanto, es importante tener en cuenta que el aumento de plantaciones forestales no es una solución aislada para mantener las capturas de carbono del sector y que debe ser considerada en conjunto con otras medidas como la reforestación de bosques nativos. Además, es fundamental implementar prácticas forestales sostenibles y equilibrar las plantaciones forestales con la conservación de la biodiversidad y la protección de los ecosistemas.

Dentro de los escenarios SSP, el SSP1 (Desarrollo Sostenible) y el SSP2 (Intermedio) podrían ser compatibles con el mantenimiento de capturas de carbono similares a las del escenario base. En estos escenarios, se prioriza un desarrollo

equilibrado, considerando tanto la expansión económica como la conservación ambiental (IPCC, 2018). Esto podría llevar a la implementación de prácticas forestales sostenibles y la promoción de medidas de conservación y restauración de ecosistemas, lo cual ayudaría a mantener capturas de carbono similares a las del escenario base.

Por otro lado, el SSP5 (Desarrollo Alto) podría generar un aumento en la demanda de productos forestales y una mayor expansión de las plantaciones forestales, lo cual podría afectar negativamente la biodiversidad y los ecosistemas. Para mantener las capturas de carbono en este escenario, sería necesario equilibrar el crecimiento económico con la conservación ambiental y la implementación de prácticas forestales sostenibles.

Considerando los escenarios SSP compatibles con el nivel de captura de carbono en el escenario base, se pueden identificar los RCP factibles asociados. El SSP1 (Desarrollo Sostenible) se asocia con el RCP 2.6, donde las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen significativamente y el aumento de la temperatura global es inferior a 2°C respecto a los niveles preindustriales, limitando las consecuencias del cambio climático (IPCC, 2014).

En el SSP2 (Intermedio), los RCP factibles incluyen el RCP 4.5 y el RCP 6.0, ambos con mayores riesgos de eventos extremos y cambios en los patrones de precipitación, resultando en un calentamiento global entre 2°C y 3°C (IPCC, 2014).

En el caso del SSP5 (Desarrollo Alto), el RCP factible es el RCP 8.5, caracterizado por un aumento continuo en las concentraciones de gases de efecto invernadero y un calentamiento global superior a 4°C respecto a los niveles preindustriales, lo cual intensificaría las consecuencias del cambio climático y requeriría una mayor adaptación y mitigación (IPCC, 2014).

A continuación, se abordan los compromisos nacionalmente determinados (NDC) asociados al sector UTCUTS, expuestos en el capítulo de antecedentes (Capítulo 2).

Para lograr el aumento de bosques nativos propuestos en los compromisos de Chile (NDC), es necesario revertir la tendencia actual de disminución de estos ecosistemas. Este desafío implica un esfuerzo considerable, especialmente teniendo en cuenta la relevancia económica de las plantaciones forestales en el país y su expansión en detrimento de los bosques nativos. Para enfrentar es-

ta problemática, se requiere la implementación de políticas y estrategias que fomenten la recuperación y conservación de bosques nativos. Es fundamental enfocarse en la protección de bosques nativos antiguos, el estímulo de la regeneración natural y la promoción de prácticas forestales sostenibles que garanticen la preservación de la biodiversidad y la integridad ecológica. Lo último incluye a las plantaciones forestales.

Respecto a mantener las capturas de carbono en el sector UTCUTS, los resultados indican que, bajo el escenario base, se mantienen las capturas de carbono. Sin embargo, la velocidad de los cambios de usos de suelo en combinación a los incendios forestales pueden afectar significativamente la condición de sumidero.

El compromiso de Chile de no exceder las 1.100 MtCO₂eq de emisiones de GEI entre 2020 y 2030, con un máximo en 2025, es ambicioso pero factible. El presente estudio resalta la importancia de priorizar la recuperación de bosques nativos y promover prácticas sostenibles en las plantaciones forestales como estrategias clave para alcanzar las metas de reducción de emisiones. Esto implica que Chile puede optimizar el uso de sus recursos naturales en el marco de su compromiso de mitigación. Además, es esencial mantener los objetivos de reducción de emisiones en los demás sectores.

Capítulo 5

Conclusiones

En esta memoria de titulación, se obtuvieron series de tiempo de cambios en los usos de suelo a nivel regional (MCUSR) en Chile, las cuales pueden ser utilizadas tanto para modelos de balance de carbono como para modelos hidrológicos y de calidad de agua. Estos datos ofrecen información valiosa para analizar las tendencias en el uso del suelo y comprender cómo estos cambios pueden afectar el medio ambiente y los recursos naturales.

Se observó una tendencia al alza en las plantaciones forestales y una tendencia a la baja en las superficies de cultivos y bosques nativos. Las principales especies con aumento en las plantaciones forestales son *Pinus radiata* y *Eucalyptus*. Los cambios en los usos de suelo pueden tener implicancias en la calidad del agua, la hidrología, la captura de carbono, la biodiversidad y la capacidad de adaptación y mitigación ante el cambio climático. Es importante considerar estos aspectos al formular políticas públicas y desarrollar estrategias de gestión de recursos hídricos y terrestres.

Las problemáticas asociadas a estos cambios en los usos de suelo incluyen la pérdida de biodiversidad, la erosión del suelo, la disminución de la calidad del agua y la reducción de la capacidad de los ecosistemas para capturar carbono y adaptarse al cambio climático. Por ejemplo, la expansión de las plantaciones forestales puede provocar una disminución de la disponibilidad de agua y una mayor vulnerabilidad a los incendios forestales. Además, la conversión de bosques nativos y tierras agrícolas en plantaciones forestales puede reducir la diversidad de hábitats y afectar la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios esenciales, como la polinización y el control de plagas.

Para abordar estas problemáticas y mitigar el cambio climático, es una estrategia clave fomentar la reforestación de bosques nativos y restauración de áreas degradadas, promover prácticas agrícolas sostenibles y proteger los ecosistemas

y servicios ecosistémicos. La reforestación y restauración de áreas degradadas pueden ayudar a mejorar la capacidad de captura de carbono, conservar la biodiversidad y proteger al agua y la calidad de la misma. Además, las prácticas agrícolas sostenibles pueden reducir la erosión del suelo, mejorar la calidad del agua y mantener la productividad de los sistemas agrícolas en el contexto de los cambios en los usos de suelo y el cambio climático. Finalmente, la protección de los ecosistemas y servicios ecosistémicos es esencial para garantizar la resiliencia de los sistemas naturales y humanos frente a los cambios en los usos de suelo y el cambio climático.

Además, en esta memoria de titulación, se desarrolló un modelo de balance de carbono para estimar las trayectorias asociadas al balance de GEI del sector UTCUTS en Chile. Se proyectó que, en el escenario BAU, las capturas oscilarían entre -60.000 [kt CO₂eq] y -70.000 [kt CO₂eq], según el análisis de sensibilidad realizado respecto a las tasas de cambio de uso de suelo. Se concluyó que existe una relación inversa entre la tasa de cambio de uso de suelo y la capacidad de captura de carbono del sector UTCUTS. Así, es esencial mantener un equilibrio adecuado entre el desarrollo económico y la conservación de los ecosistemas para asegurar la capacidad de captura de carbono en el país.

Los incendios forestales son un factor determinante en la capacidad de captura de carbono del sector UTCUTS. Por lo tanto, es fundamental implementar medidas preventivas y de mitigación del riesgo de incendios para preservar la capacidad de captura de carbono en el país.

Chile debe poner esfuerzos en la reforestación de bosques nativos para cumplir con sus compromisos nacionales en materia de cambio climático. Además, es necesario mantener la condición de sumidero de carbono del sector UTCUTS para alcanzar los objetivos climáticos establecidos a nivel nacional e internacional.

Con las proyecciones obtenidas en este estudio y considerando a Chile como un caso aislado del mundo, son posibles los escenarios SSP1, SSP2 y SSP5. Estos escenarios representan diferentes trayectorias de desarrollo socioeconómico y políticas de mitigación y adaptación al cambio climático. Será fundamental que las autoridades y los actores involucrados en la gestión del territorio y los recursos naturales tengan en cuenta estos escenarios al diseñar y aplicar estrategias y políticas de desarrollo sostenible.

Para aumentar la precisión de los cálculos, es oportuno mejorar la calidad de

los datos relacionados con los usos de suelo. Esto podría lograrse mediante una detección más precisa de dichos usos a lo largo del tiempo, así como realizando campañas de monitoreo anuales o semestrales. Además, resulta recomendable que esta información esté accesible para la comunidad científica y tomadores de decisiones. De esta manera, será posible abordar de forma efectiva y sostenible los desafíos asociados al cambio climático, mediante un seguimiento continuo de los cambios en el uso de suelo y la actualización periódica de las proyecciones.

Para futuros estudios se recomienda la posibilidad de realizar un análisis más profundo a partir de los resultados del presente estudio. Se podría por ejemplo realizar un análisis de frecuencia a los incendios forestales y modelar escenarios futuros en base al escenario BAU presentado con una simulación de la magnitud de los incendios forestales en base al análisis de frecuencia. Otro posible estudio podría ser el de analizar posibles escenarios de cambios de uso de suelo basados en el BAU definidos por un análisis integral de lo que está ocurriendo y podría ocurrir en Chile.

En futuros estudios, se sugiere profundizar en el análisis a partir de los resultados obtenidos en la presente investigación. Un enfoque podría ser llevar a cabo un análisis de frecuencia de los incendios forestales y modelar escenarios futuros basados en el escenario BAU, simulando la magnitud de estos incendios a partir del análisis de frecuencia mencionado. Otra posibilidad consiste en analizar escenarios alternativos de cambios en el uso de suelo, basados en el BAU, a través de un análisis integral que contemple las dinámicas actuales y futuras en Chile. Ambos enfoques permitirán obtener información valiosa para abordar los desafíos del cambio climático y la gestión sostenible del territorio en el país.

En conclusión, la información obtenida en este estudio sobre los cambios en los usos de suelo en Chile y sus implicancias en la captura de carbono es relevante para la toma de decisiones en cuanto a la gestión de recursos terrestres, así como para el cumplimiento de los compromisos climáticos. Las recomendaciones presentadas en este trabajo pueden contribuir a un enfoque integral y sostenible en la gestión del territorio y los recursos naturales, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible y las metas climáticas nacionales y globales.

Bibliografía

Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Adams, M. A. (2013). Mega-fires, tipping points and ecosystem services: Managing forests and woodlands in an uncertain future. *Forest Ecology and Management*.

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Van Liew, M. W. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2022). Ley N° 21.389: Establece el marco normativo para el cambio climático. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>.

Brancalion, P. H. S., Broadbent, E. N., de-Miguel, S., Cardil, A., Rosa, M. R., Almeyda-Zambrano, A. M., ... & Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances*.

Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*.

Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Lamb, D., Laestadius, L., Calmon, M., & Kumar, C. (2016). A policy-driven knowledge agenda for global forest and landscape restoration. *Conservation Letters*.

Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutmann, E. D., Vano, J. A., Gangopadhyay, S., Wood, A. W., ... & Brekke, L. D. (2016). Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change.

CONAF. (2021). Catastro Vegetacional. Recuperado el 22 de abril de 2023, de <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>.

CONAF. (2022). Incendios Forestales. Período 2016-2021. Corporación Nacional Forestal. Recuperado de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32812/1/Estadistica_Incendios_Forestales.pdf.

- D'Amato, A. W., Bradford, J. B., Fraver, S., & Palik, B. J. (2011). Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *Forest Ecology and Management*.
- DeFries, R., Hansen, A., Turner, B. L., Reid, R., & Liu, J. (2004). Land use change around protected areas: management to balance human needs and ecological function. *Ecological Applications*.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E., Ngo, H. T., Guèze, M., Agard, J., ... & Chan, K. M. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*.
- Garg, V., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., & Srivastav, S. K. (2019). Human-induced land use land cover change and its impact on hydrology. *HydroResearch*.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*.
- Gobierno de Chile. (2008). Ley 20283: Ley sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Gobierno de Chile. (2020). Contribución Nacionalmente Determinada 2020.
- Gobierno de Chile. (2021). Estrategia climática de largo plazo de Chile. Ministerio del Medio Ambiente. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf>.
- Gobierno de Chile. (2022). Fortalecimiento de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) Chile, noviembre 2022. Recuperado de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/01/Chile-Fortalecimiento-NDC-nov22.pdf>.
- Grêt-Regamey, A., Weibel, B., Kienast, F., Rabe, S. E., & Zulian, G. (2015). A tiered approach for mapping ecosystem services. *Ecosystem Services*.
- Hofflinger, A., Nahuelpan, H., Boso, À., & Millalen, P. (2021). Do large-scale

- forestry companies generate prosperity in indigenous communities? The socio-economic impacts of tree plantations in southern Chile.
- Instituto Forestal (INFOR). (s. f.). Sector forestal. Ministerio de Agricultura. Recuperado el 2 de febrero de 2023, de <https://wef.infor.cl/index.php/sector-forestal>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories V4 Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- IPCC. (2013). AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2014). AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Chapter 11: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU).
- IPCC. (2014). AR5 Synthesis Report Climate Change 2014.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press.
- Lepers, E., Lambin, E. F., Janetos, A. C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., & Scholes, R. J. (2005). A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981-2000. *BioScience*.
- Le Quéré, C., et al. (2013). The global carbon budget 1959–2011.
- Mahmood, R., Pielke, R. A., Hubbard, K. G., Niyogi, D., Bonan, G., Lawrence, P., ... & Syktus, J. (2010). Impacts of land use/land cover change on climate and future research priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Ministerio de medio ambiente. (2020). 4to Informe Bienal de actualización de Chile sobre Cambio Climático. Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2021). Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018. Oficina de Cambio Climático. Santiago, Chile.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*.

- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development.
- Paquette, A., & Messier, C. (2010). The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*.
- Potapov, P., Hansen, M. C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., ... & Esipova, E. (2017). The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*.
- Riahi, K., et al. (2016). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*.
- Ramaswamy, V., Boucher, O., Haigh, J., Hauglustaine, D., Haywood, J., Myhre, G., Nakajima, T., Shi, G. Y., & Solomon, S. (2001). Radiative forcing of climate change. En J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C. A. Johnson (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Shepherd, T. G., Boyd, E., Calel, R. A., Chapman, S. C., Dessai, S., Dima-West, I. M., ... & Zenghelis, D. A. (2018). Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design.
- UNFCCC. (2013). Decisión 24/CP.19: Guidelines for the technical review of information reported under the Convention related to greenhouse gas inventories, biennial reports and national communications by Parties included in Annex I to the Convention. Recuperado de <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a02.pdf#page=14>.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris Agreement. Recuperado de https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*.

Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., O'Neill, B. C., Ebi, K. L., Riahi, K., Carter, T. R., Edmonds, J., Hallegatte, S., Kram, T., Mathur, R., & Winkler, H. (2014). A new scenario framework for climate change research: Scenario matrix architecture. *Climatic Change*.

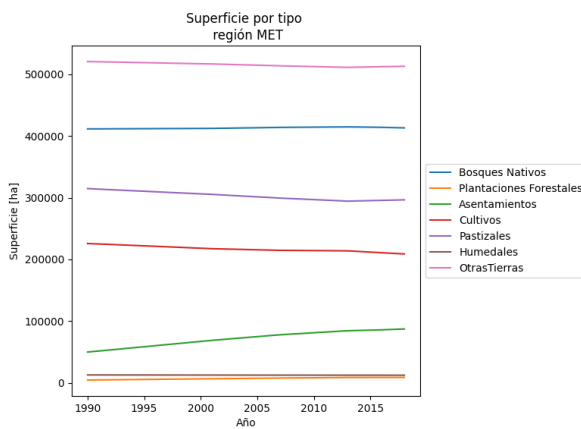
White, M. J., & Chaubey, I. (2005). Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. *Journal of the American Water Resources Association*.

Zhang, L., Nan, Z., Yu, W., Zhao, Y., & Xu, Y. (2018). Comparison of baseline period choices for separating climate and land use/land cover change impacts on watershed hydrology using distributed hydrological models.

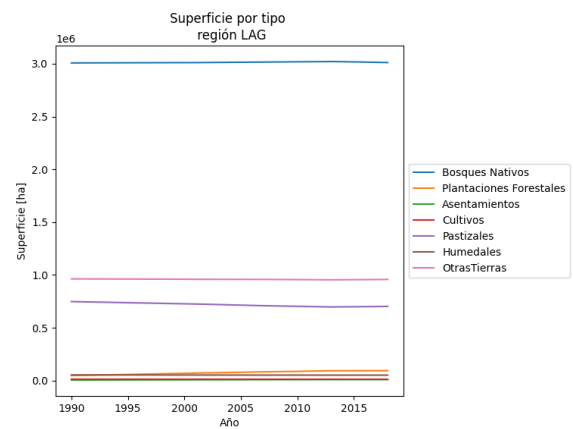
Anexos

Anexo A. Usos de suelo regionales

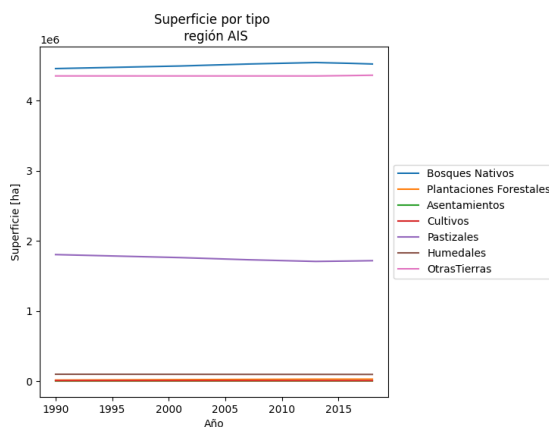
En el presente Anexo se muestran los resultados de uso de suelo para las regiones que no están destacadas en la Figura 4.2 del capítulo de resultados.



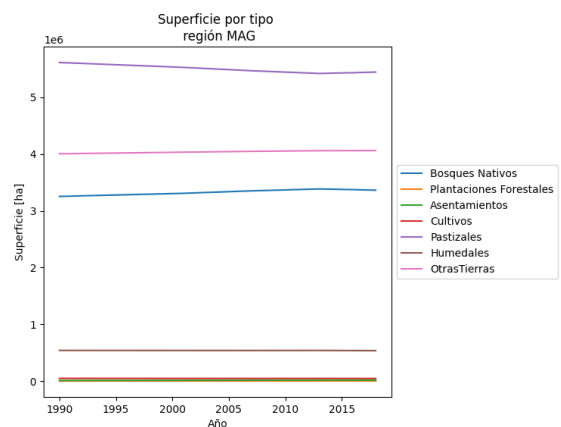
(a) Región Metropolitana



(b) Región de Los Lagos

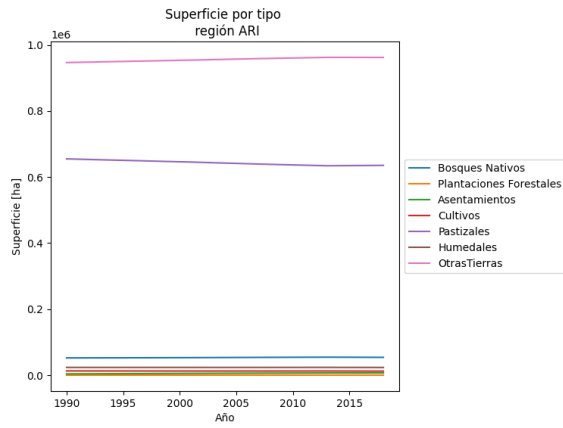


(c) Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

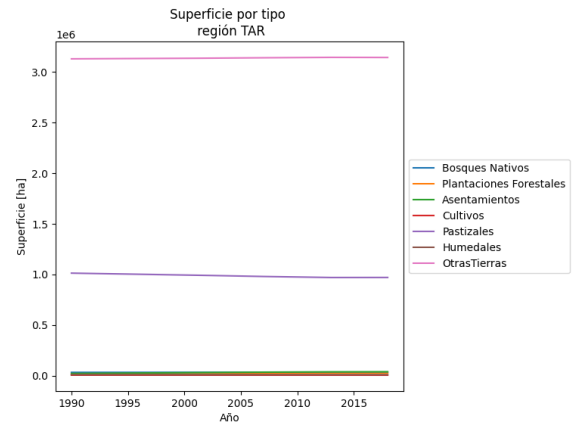


(d) Región de Magallanes y de la Antártica Chilena

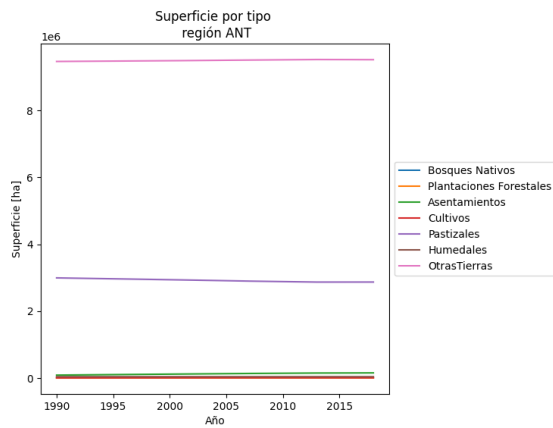
Figura A.1: Superficie total que se tiene por cada tipo de uso de suelo en otras regiones de la zona centro y sur de Chile.



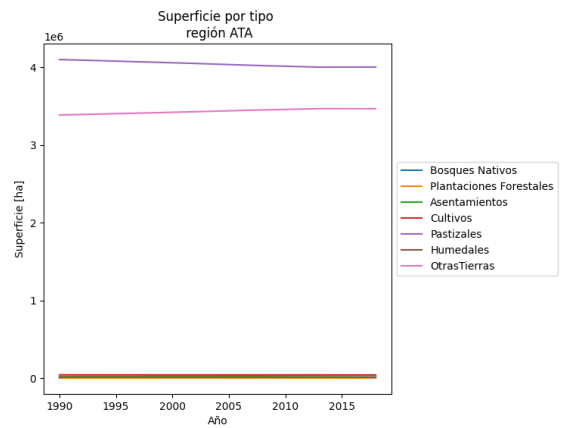
(a) Región de Arica y Parinacota



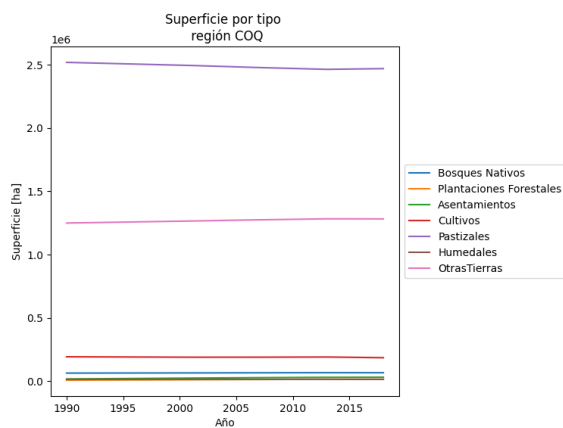
(b) Región de Tarapacá



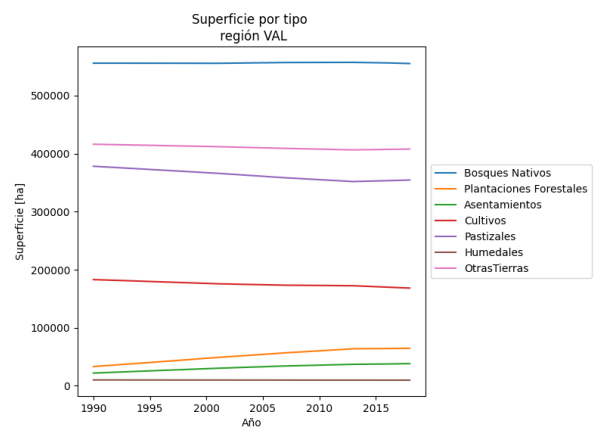
(c) Región de Antofagasta



(d) Región de Atacama



(e) Región de Coquimbo



(f) Región de Valparaiso

Figura A.2: Superficie total que se tiene por cada tipo de uso de suelo en otras regiones de la zona centro y norte de Chile.

En la Figura A.1 se muestran los usos de suelo estimados para las regiones Metropolitana, Los Lagos, Aysen y Magallanes. Por otro lado, la Figura A.2

presenta los usos de suelo para las regiones de Arica, Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo y Valparaíso. Se clasifican en Bosques Nativos, Plantaciones Forestales, Asentamientos, Tierras de Cultivo, Pastizales, Humedales y Otras Tierras.

Anexo B. Anexos digitales

En el presente anexo se encuentra el link para descargar las matrices de cambio y uso de suelo regionales que están disponibles en el “Repositorio de datos de investigación” de la Universidad de Chile:

[Matrices de cambio y uso de suelo regionales en Chile para el periodo 1990 - 2018](https://datos.uchile.cl/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.34691/UCHILE/G496P4)

<https://datos.uchile.cl/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.34691/UCHILE/G496P4>

Este conjunto de datos presenta matrices regionales de cambio de uso del suelo, expresadas en hectáreas, que reflejan las transiciones anuales entre diferentes tipos de uso del suelo en cada región. Las columnas indican el uso del suelo del año actual (correspondiente al año del archivo), mientras que las filas representan el uso del suelo del año anterior. Para interpretar correctamente la matriz, es necesario reemplazar los números en las cabeceras de las filas con los tipos de uso de suelo correspondientes a las columnas. Es decir, la primera fila (número cero) corresponde al primer tipo de uso de suelo de la primera columna, la segunda fila (número uno) al segundo tipo de uso de suelo, y así sucesivamente.

Los valores ubicados en la diagonal principal de la matriz representan las áreas (en hectáreas) que conservan el mismo uso del suelo de un año a otro. Por otro lado, los valores fuera de la diagonal indican las áreas que han experimentado un cambio en su uso del suelo, pasando del tipo de uso de suelo señalado en la cabecera de la fila (año anterior) al tipo de uso de suelo indicado en la cabecera de la columna (año actual). Los datos presentados en este conjunto fueron estimados mediante un proceso de optimización, utilizando series temporales de matrices de cambio de uso de suelo a nivel nacional (proporcionadas por CONAF a través de solicitudes de transparencia) y datos actualizados hasta agosto de 2021, detallados por especie de uso de suelo.