



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE LA
PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA AÉREA EXPRESADA EN
TÉRMINOS DE EXERGÍA DE LAS REGIONES DEL BIOBÍO
Y ÑUBLE, CHILE

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

DOMINIQUE GOECKE COLL

Profesora guía: Dra. Yannay Casas Ledón

Profesor co-guía: Dr. Mauricio Aguayo

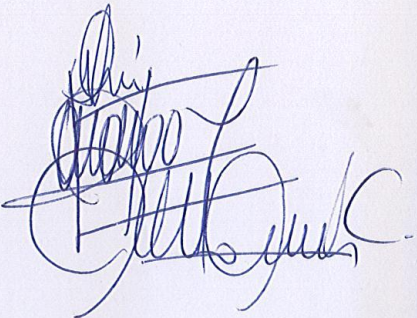
Profesor comisión: Dr. Alberto Araneda

Concepción, Chile

2019

**“Efecto del cambio de uso de suelo sobre la producción primaria neta aérea en términos de
exergía de las regiones de Biobío y Ñuble, Chile”**

PROFESOR GUÍA: Dra. Yannay Casas Ledón
PROFESOR CO - GUÍA: Dr. Mauricio Aguayo Arias
PROFESOR COMISIÓN: Dr. Alberto Araneda Castillo



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, marzo 2019



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPÍRITU

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo general.....	2
1.1.2.	Objetivos específicos.....	2
2.	ANTECEDENTES	3
2.1.	Suelo como recurso natural	3
2.2.	Cambio de uso de suelo	4
2.3.	Cambio de uso de suelo en Chile	5
2.4.	Evaluación de impactos: Análisis del Ciclo de Vida.....	7
2.5.	Indicadores del impacto del uso de suelo.....	10
2.6.	Producción Primaria Neta (PPN).....	13
2.7.	PPN en términos de exergía.....	16
3.	METODOLOGÍA.....	19
3.1.	Cambio de uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble.....	19
3.1.1.	Descripción del caso de estudio	19
3.1.2.	Definición de categorías de usos de suelo	21
3.1.3.	Creación de matriz de transición	22
3.2.	PPN aérea en términos de g C/año por uso de suelo.....	23
3.2.1.	Obtención de PPN aérea en términos de kg C/m ² año.....	23
3.2.2.	Correlación de PPN aérea por uso de suelo (g C/año).....	25
3.3.	Estimación de PPN aérea en términos de exergía por uso de suelo	25
3.3.1.	Cálculo de PPN en términos de MJ _{ex} /m ² año.	25
3.3.2.	Correlación de PPN aérea por uso de suelo (MJ _{ex} /m ² año).....	26

3.4. Estudio del efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea (MJ_{ex}/m^2 año)	26
3.4.1. Estimación de la transición de PPN aérea debido al cambio de uso de suelo	26
3.4.2. Análisis del efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea en términos de exergía.....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1. Análisis espacial y temporal de los cambios de uso de suelo.....	27
4.2. Transición del cambio de uso del suelo.....	31
4.3. Correlación de la PPN aérea por uso de suelo ($Tg C/año$).....	35
4.4. Control de calidad de datos de PPN.....	38
4.5. Análisis espacial y temporal PPN aérea en términos de exergía.....	39
4.6. Correlación de la PPN en términos de MJ_{ex}/m^2 año por cada uso de suelo	42
4.7. Efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea (MJ_{ex}/m^2 año)	44
5. CONCLUSIONES.....	51
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
7. ANEXOS	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores para determinar el impacto del uso del suelo en el contexto de ACV, referencias, fundamento y categoría de daño impactada.	11
Tabla 2. Metodologías basadas en exergía para contabilizar recursos.....	17
Tabla 3. Tasa de cambio, ganancia, pérdida, cambio neto y de la superficie de cada uso de suelo entre 1994 y 2015.	29
Tabla 4. Matriz de transición del cambio y uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble, período 1994-2015 (ha).	32



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cadena de causa-efecto de la ocupación del suelo y su transformación.	9
Figura 2. Componentes de la AHPPN según Haberl et al. (2007). PPN0: PPN en ausencia del ser humano; PPNts: cambios en la PPN inducidos por el humano; PPNc: PPN cosechada o destruida durante la cosecha; PPNr: PPN remanente en el ecosistema posterior a la cosecha. PPNa: PPN aérea, sobre la superficie del suelo; PPNs: PPN subterránea, bajo la superficie del suelo.	15
Figura 3. Proceso de transformación en términos de exergía.	16
Figura 4. Actividades a seguir basadas en los objetivos planteados.	19
Figura 5. Características geomorfológicas del área de estudio.	20
Figura 6. Usos de suelo del área de estudio.	21
Figura 7. Períodos de tiempo de las matrices de transición.	22
Figura 8. Años en los cuales se obtuvo la PPN aérea por medio de MODIS.	25
Figura 9. Correlación entre usos de suelo y PPN aérea, según información disponible. a) datos de uso de suelo y b) datos de PPN.	25
Figura 10. Dinámica del uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble. Se ilustra el uso de suelo de 1994, 2007 y 2015 y la variación entre dichos años.	27
Figura 11. PPN aérea (Tg C/año) por uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble. Solo se muestran los usos que contienen vegetación.	36
Figura 12. Datos de Control de Calidad (CC) extraídos de MODIS. a) Porcentaje anual de días con información de baja calidad durante la época de crecimiento (promedio de 2000, 2007 y 2014). b) Porcentaje de días de baja calidad de datos, por uso de suelo.	39

Figura 13. Georreferenciación de la PPN ($\text{MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2$ año) y sus variaciones en 2000-2007, 2007-2014 y 2000-2014.....	40
Figura 14. PPN en términos de exergía ($\text{MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2$ año) por uso de suelo de 2000, 2007 y 2014.....	42
Figura 15. Variación de la PPN aérea producto del cambio de uso de suelo (% con respecto a la cantidad existente en 2000). Transición desde bosque nativo adulto y bosque nativo renoval hacia otros usos de suelo en el período 2000-2014.....	46
Figura 16. Variación de la PPN aérea producto del cambio de uso de suelo (% con respecto a la cantidad existente en 2000). Transición desde praderas y matorrales hacia otros usos de suelo en el período 2000-2014.....	47
Figura 17. Variación de la PPN aérea producto del cambio de uso de suelo (% con respecto a la cantidad existente en 2000). Transición desde terrenos agrícolas y plantaciones forestales hacia otros usos de suelo en el período 2000-2014.	49
Figura 18. Representación del balance exergético de la producción de biomasa de sistemas naturales (izquierda) y antrópicos (derecha).....	50

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Usos de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble del año 2015.....	60
Anexo 2. Usos de suelo de la región del Biobío y Ñuble (1994, 2007 y 2015) y su reclasificación.....	60
Anexo 3. Tasa de cambio, ganancia, pérdida y cambio neto por uso de suelo, por períodos.	63
Anexo 4. Matrices de transición del cambio de uso de suelo, por períodos.....	65
Anexo 5. PPN aérea (Tg C/año) por uso de suelo, según año estudiado.	67
Anexo 6. Máxima, mínima, media y desviación estándar de la PPN en términos de Pg C/año, por año estudiado.....	67
Anexo 7. Dinámica de la PPN aérea y su variación durante los años estudiados.	68
Anexo 8. Porcentajes de pérdida y ganancia de PPN, según períodos estudiados.	69
Anexo 9. PPN potencial determinada por Alvarenga et al. (2013b)	70
Anexo 10. Máxima, mínima, media y desviación estándar de PPN aérea (MJ_{ex}/m^2 año) por uso de suelo, según años estudiados.....	71
Anexo 11. Matrices de transición de la PPN en términos de exergía.....	72
Anexo 12. PPN aérea total por año ($PJ_{ex}/año$) y su variación (%).....	75

AGRADECIMIENTOS

A mi madre y a mi padre, quienes me apoyaron y alentaron a su manera (la mejor).

A la profesora Yannay, por confiar en mí y darme la oportunidad de formar parte de su proyecto, y al profesor Mauricio, por las lecciones de vida entregadas.

A mis amigas y amigos (como la cofradía, mis princess y las PSYPS) por el apoyo, ánimo y buena onda entregado durante todo el proceso.

Y a aquellas personas que estuvieron en el momento justo para alentarme, incluso a aquellas que solo pensaron en mandarme buenas energías.

¡¡Muchas gracias a todos!!

El presente trabajo fue financiado por el proyecto Fondecyt 11170302.

Dentro de veinte años estarás más decepcionado por las cosas que no hiciste, que por las que hiciste. Así que suelta las amarras. Navega lejos del puerto seguro. Atrapa los vientos alisios en tus velas. Explora. Sueña. Descubre.

- Mark Twain

RESUMEN

En Chile se han registrado las consecuencias del cambio de uso de suelo con respecto a los cambios de cobertura y al efecto en la biodiversidad, pero no se ha visualizado al suelo como recurso natural, por lo que el impacto sobre la calidad de dicho recurso no se ha estudiado. La producción primaria neta (PPN) se ha utilizado como indicador de la intensidad del uso de suelo y, por otra parte, la exergía entrega el potencial de trabajo útil derivado del suelo, es decir, la eficiencia del uso de suelo, por lo que al combinar la PPN y la exergía se obtiene resultados confiables y en una unidad de medida estandarizada.

El objetivo del presente estudio es analizar el efecto del cambio de uso de suelo sobre la producción primaria neta aérea en términos de exergía de las regiones del Biobío y Ñuble. Para lo anterior se correlacionará la información de uso de suelo suministrada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) con la PPN aérea proveniente de imágenes satelitales entregadas por la NASA. Para transformar la PPN aérea a términos de exergía se utilizó el factor de conversión biomasa-exergía determinado por Alvarenga et al. (2013b).

Los resultados indican que entre 1994 y 2015 las plantaciones forestales fueron el uso de suelo que más hectáreas ganaron, mientras que las mayores pérdidas se otorgaron a los terrenos agrícolas. En términos de kg C/año, las plantaciones forestales produjeron las mayores cantidades de PPN entre 2000 y 2014, superando con creces a los otros usos de suelo. Dicha diferencia disminuyó en términos de MJ_{ex}/m^2 año donde, además, se observó una relativa constancia en la productividad de las plantaciones, seguida de los bosques nativos y de los matorrales.

En síntesis, el efecto positivo o negativo del cambio de uso de suelo sobre la producción primaria neta aérea va a depender de la importancia económica o cultural que posea el uso al cual se está cambiando. Se debe considerar que la producción de biomasa dependerá de los insumos suministrados, los cuales dependerán del tipo de uso de suelo en cuestión (natural o antrópico).

1. INTRODUCCIÓN

El suelo provee de una serie de servicios ecosistémicos vitales para el ser humano, lo que lo convierte en un recurso natural fundamental para la vida humana. Sin embargo, considerando que es un recurso limitado, el aumento de la población mundial presiona la obtención de energía y alimento, provocando una intensificación en el uso de suelo y un aumento del cambio de uso. Lo anterior ha provocado una serie de efectos negativos a nivel global sobre el balance energético, ciclos naturales del ecosistema y sobre la biodiversidad, entre otros.

En Chile se han registrado las consecuencias del cambio de uso de suelo con respecto a los cambios de cobertura y al efecto en la biodiversidad, los que han sido más intensos en la zona centro-sur del país, pero no se ha visualizado al suelo como recurso natural, por lo que el impacto sobre la calidad de dicho recurso no se ha estudiado.

La producción primaria neta (PPN) es la energía o carbono producido por los organismos fotosintéticos que está disponible en la cadena trófica. Diversos estudios la han utilizado como indicador de la intensidad del uso de suelo puesto que considera las realidades regionales, a diferencia de otros indicadores que se basan en antecedentes europeos. Además, la PPN se relaciona con la energía química del sistema, de hecho, proporciona la energía inicial de la cadena trófica, disponible para ser transferida. Se han estudiado las cantidades de carbono y su movimiento dentro de la PPN potencial, PPN cosechada y PPN remanente en el ecosistema, donde esta última se compone de la PPN aérea y la PPN subterránea.

El concepto de exergía entrega el potencial de trabajo útil derivado del suelo (en este caso, la cantidad de biomasa útil), es decir, la eficiencia con la que se usa el suelo. Al combinar la PPN y la exergía se logra evaluar la intensidad del uso de suelo y el efecto de este sobre de la calidad de dicho recurso, obteniendo resultados fidedignos y en una unidad de medida estandarizada ($\text{MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2 \text{ año}$).

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el presente estudio aporta al objetivo N°15 “Vida de Ecosistemas Terrestres”, el que apunta a conservar y recuperar el uso de ecosistemas terrestres (PNUD, 2015). Hoy en día el recurso suelo se ha transformado en un factor relevante en políticas ambientales y planificaciones territoriales, entre otros, adquiriendo la importancia que amerita.

Conforme a lo planteado anteriormente y destacando que no existen estudios anteriores sobre el impacto del uso de suelo en la zona centro-sur de Chile en términos de exergía, surge la siguiente pregunta de investigación: considerando la producción primaria neta como indicador de la intensidad del uso de suelo y la cantidad exergética de un recurso como medida de su calidad, ¿cómo han afectado los cambios de uso de suelo sobre la eficiencia en su uso en el centro-sur de Chile?

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es el analizar el efecto del cambio de uso de suelo sobre la producción primaria neta aérea en términos de exergía de las regiones del Biobío y Ñuble.

1.1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos se plantea:

- i. Analizar el cambio de uso de suelo ocurridos en las regiones del Biobío y Ñuble.
- ii. Cuantificar la PPN aérea en términos de g C/año a partir de los cambios de uso de suelo registrados.
- iii. Estimar la PPN aérea en términos de MJ_{ex}/m^2 año por cada uso de suelo.
- iv. Estudiar el efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea (MJ_{ex}/m^2 año).

2. ANTECEDENTES

2.1. Suelo como recurso natural

El suelo es un recurso fundamental para el ser humano pues es la base para la producción de alimento, fibras, combustible y medicamento, entre otras funciones (FAO, 2015). Además, es el sostén de una serie de servicios ecosistémicos, servicios obtenidos del medio ambiente que benefician al ser humano (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), los cuales se clasifican en 4 grupos:

- Servicios de regulación: la regulación del clima y de la erosión, la purificación del agua, el tratamiento de residuos y la polinización son algunos de los procesos naturales regulados por los ecosistemas, vitales para el humano.
- Servicios culturales: corresponden a los beneficios intangibles, como la diversidad cultural, valores espirituales, religiosos y educacionales, recreación y turismo, etc.
- Servicios de aprovisionamiento: son los productos obtenidos del ambiente, como comida, combustibles, agua dulce, medicina natural, etc.
- Servicios de soporte: como su nombre lo indica, son los servicios necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos. A diferencia de los otros servicios, los impactos en los servicios de soporte son indirectos u ocurren transcurrido un gran período de tiempo. Se incluye la fotosíntesis, producción primaria, ciclo de nutrientes, ciclo del agua y la formación de suelo.

Estos servicios no solo benefician al ser humano, sino que hacen posible la vida en el planeta (FAO, 2018). Se sustentan en gran medida en el suelo, puesto que dicho recurso suministra materiales de construcción, es la base para infraestructuras humanas, provee de herencia cultural, es una fuente de productos farmacéuticos y recursos genéticos, suministra alimentos, fibras y combustibles, regula las inundaciones y aporta en la retención de carbono, la purificación del agua, la reducción de contaminantes, la regulación del clima y en el ciclo de nutrientes (FAO, 2015).

Por otro lado, el suelo es el sostenedor de la actividad más importante para el humano y que se inició hace más de diez mil años; la agricultura, actividad que ha promovido el desarrollo de todo tipo de culturas hasta el día de hoy, donde por más avances tecnológicos que se hayan desarrollado la humanidad sigue ligada a lo que la tierra le pueda proveer (Leiva, 2014).

A pesar que el suelo otorga múltiples beneficios al bienestar humano, el incremento de la población mundial presiona la obtención de productos agrícolas (WWF, 2018; MEA, 2005; FAO, 2015). La limitada superficie productiva de este recurso se encuentra sometida a una creciente presión en búsqueda de satisfacer la demanda de alimentos, energía y extracción de materias primas, intensificando el uso de suelo agrícola (FAO, 2015).

2.2. Cambio de uso de suelo

La Evaluación Ecosistémica del Milenio reportó que aproximadamente un cuarto de la superficie terrestre de la Tierra ha cambiado a sistemas de siembra. Incluso, en los últimos 150 años se ha perdido la mitad de la capa superficial del suelo, destacando la transformación de bosques y praderas a campos de cultivos y pastizales (WWF, 2018).

La habilitación de terrenos de cultivo por medio de la deforestación de bosques o la quema a cielo abierto es un ejemplo del cambio en la forma en la que se usa el suelo, o sea, del cambio de uso de suelo (IPCC, 2000). El transformar un suelo o uso agrícola a un uso urbano también es un ejemplo de cambio de uso de suelo.

El explosivo cambio de uso de suelo constatado en el último tiempo ha sido provocado en primer lugar por la expansión agrícola y en segundo lugar por la urbanización, la deforestación en los trópicos y la forestación en regiones templadas (Song et al., 2018). Lo anterior no quiere decir que la expansión agrícola es la expansión dominante a nivel global, puesto que existen zonas donde la urbanización ha aumentado exponencialmente, presionando incluso terrenos agrícolas, entre otros usos (López y Plata, 2009). Otras actividades que han enfatizado el cambio

de uso de suelo son la deforestación y forestación, explicadas por la teoría de transición de bosques; el despeje de vegetación (para la agricultura) y el pastoreo, junto con la obtención de madera como materia prima, promovieron la deforestación de bosques nativos, situación que evolucionó a la reforestación y forestación, actividades registradas en distintas naciones y motivadas generalmente por el Estado, con el fin de aportar al crecimiento económico del país (Mather, 2008; Heilmayr et al., 2016).

Como consecuencia, los extensos cambios de uso de suelo exhibidos han desencadenado el cambio más significativo en la estructura de los ecosistemas, es decir, en la distribución espacial y vertical de los organismos bióticos y abióticos dentro de un ecosistema, y han modificado la capacidad del mismo de proveer de servicios ecosistémicos (MEA, 2005). La gravedad de la situación es tal, que, además, han afectado el balance energético de la superficie terrestre, la diversidad de especies y los ciclos de agua y carbono, factores que contribuyen al cambio climático (Song et al., 2018).

2.3. Cambio de uso de suelo en Chile

Chile no se aleja de lo ocurrido a nivel mundial; la expansión de sistemas de cultivos también fue la causa de los primeros cambios de uso de suelo provocando una disminución de la vegetación nativa en la Cordillera de la Costa, valle central y cordillera andina de la zona centro sur del país (Aguayo et al., 2009). Posteriormente, en la década de los 70 el Estado Chileno promovió las plantaciones forestales, principalmente de pino y eucalipto, por medio del DL 701/1974 con el propósito de incrementar su crecimiento económico sin medir las consecuencias sobre el medio ambiente (Nahuelhual et al., 2012). Si bien los bosques templados de Chile se consideran “hotspot” por su biodiversidad y endemismo, la expansión forestal fue de tal magnitud que fragmentó la vegetación nativa, disminuyendo su territorio e impactando negativamente en la biodiversidad (Echeverría et al., 2006).

Debido a los importantes incentivos, la expansión forestal se ha evidenciado desde la región de Valparaíso hasta la región de Los Lagos (Echeverría et al., 2006; Aguayo et al., 2009 ; Nahuelhual et al., 2012; Heilmayr et al., 2016; Briones y Sepúlveda-Varas, 2016; Manuschevich y Beier, 2016).

La zona centro-sur del país ha registrado los mayores cambios de uso de suelo; las principales transformaciones paisajísticas en zonas ubicadas entre las regiones del Biobío y La Araucanía se deben al desarrollo forestal, la mantención de los rubros agropecuarios y el crecimiento urbano e industrial (Aguayo et al., 2009). Asimismo, en la región de La Araucanía las plantaciones forestales no solo afectaron la vegetación nativa, sino que también provocaron una disminución en los terrenos agropecuarios (Saavedra y Sepúlveda-Varas, 2016). A pesar que la presión de las plantaciones sobre los bosques nativos ha disminuido en la última década, se debe destacar que la expansión forestal fue de tal magnitud que ubicó a Chile como uno de los pocos países en obtener ganancias (netas) de cobertura arbórea (Heilmayr et al., 2016).

Las plantaciones forestales generan importantes impactos en el ambiente; por ejemplo, el eucalipto (*Eucalyptus globulus*) es muy eficiente en la producción de biomasa, pero esta energía producida difícilmente puede transferirse a otros niveles tróficos debido a la gran protección química que poseen sus hojas, provocando un empobrecimiento del sistema (Cordero, 2011). Si bien los efectos de las plantaciones van a depender del tipo de monocultivo y de la región en la que este se ubica, en general los impactos sobre la vegetación nativa, la química del suelo o la hidrología, entre otros, son más negativos que positivos, como variaciones en el balance hídrico (producto del aumento en la evapotranspiración y disminución de la escorrentía, en comparación con vegetación baja o bosques templados) o la inhibición del crecimiento de otras especies, debido al impedimento del paso de la luz solar (plantaciones densas) o de la liberación de sustancias inhibitoras del crecimiento (existente en la hojarasca caída de los eucaliptos) (Hofstede, 2000). En este sentido resulta fundamental diferenciar entre bosques nativos y exóticos, como

lo sugieren Heilmayr et al. (2016) en su estudio sobre la transición de bosques en Chile; reportaron una disminución y posterior aumento de la cobertura arbórea del país, pero fueron los bosques nativos los que disminuyeron y, posteriormente, las plantaciones forestales las que aumentaron, trayendo consigo los efectos negativos ya señalados.

Si bien se han estudiado las razones del cambio de uso de suelo y sus consecuencias sobre la biodiversidad y el paisaje, entre otras variables, los estudios carecen de una perspectiva de visualizar el suelo como un recurso natural fundamental y limitado, donde los cambios de uso de suelo contribuyen significativamente a cambios en los servicios ecosistémicos.

En este contexto, el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida permite considerar al suelo como recurso y evaluar el impacto asociado a su cambio y uso.

2.4. Evaluación de impactos: Análisis del Ciclo de Vida

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ha permitido evaluar los impactos ambientales del cambio de uso de suelo asociados a diferentes procesos y/o actividades de forma sistémica, considerando todos los recursos (agua, combustibles fósiles, combustibles renovables y suelo) y los impactos asociados a las emisiones en toda su cadena de valor. Dicha herramienta es ampliamente utilizada para la evaluación de los procesos, permitiendo identificar dentro del ciclo de vida las etapas con mayores cargas ambientales, así como las categorías de impactos más relevantes. Las directrices y guía metodológica para realizar un análisis ambiental se encuentran estandarizadas a través de las normativas ISO 14040, la cual define los principios y marco de referencia de un ACV (ISO 14040:2006, 2018) y la ISO 14044, que especifica sobre los requisitos y directrices a seguir (ISO 14044:2006, 2018). De acuerdo a dichas normativas el ACV se estructura por cuatro fases:

- i. Definición de objetivo y alcances: se señala las razones del estudio y se define la amplitud, profundidad y detalle del mismo, es decir, los límites del

sistema, así como la unidad funcional, medida que se usa como referencia para estudios comparativos.

- ii. Análisis del inventario: se identifican y se contabilizan las entradas y salidas del sistema, considerando todos los recursos usados desde la naturaleza y la tecnósfera hasta las emisiones emitidas al medio ambiente.
- iii. Evaluación de impactos ambientales: utilizando los resultados del análisis del inventario, se evalúan los potenciales impactos en el medio ambiente producidos por las entradas y salidas del sistema, a través de diferentes modelos de evaluación de impactos.
- iv. Interpretación: Se consideran los resultados de todas las etapas anteriores para obtener conclusiones y recomendaciones que permitan tomar las mejores decisiones

En la etapa de evaluación de impactos ambientales, los aspectos ambientales (por ejemplo, emisiones a la atmósfera o consumo de combustibles fósiles) son convertidos en impactos ambientales (contaminación atmosférica o agotamiento de recursos no renovables) mediante diferentes modelos de evaluación de impactos, tales como Eco-indicador 99, ReCiPe y CML 2001, entre otros. Para ello se utilizan los factores de caracterización (FC), los cuales valorizan el impacto sobre el medio ambiente de los recursos naturales utilizados y los contaminantes producidos en el sistema (Hischier, 2010).

Dichos modelos se clasifican según sus alcances o niveles; por un lado, se encuentra el nivel de punto intermedio que considera categorías de impacto enfocadas al problema, es decir, al efecto directo producidos por las entradas y/o salidas del sistema. Por otro lado, se encuentra el nivel de punto final que considera las categorías de daño, enfocadas principalmente a los daños producidos en las áreas que al ser humano le interesa proteger (salud humana, salud del ecosistema y agotamiento de los recursos).

Con respecto al punto intermedio, la mayoría de los modelos de evaluación de impactos consideran las siguientes categorías de impacto:

- Calentamiento global
- Acidificación
- Eutrofización
- Agotamiento de la capa de ozono
- Precusores de ozono troposférico
- Ruido
- Agotamiento de recursos abióticos
- Toxicidad (humana, acuática y terrestre)
- Olor
- Uso de agua
- Uso de suelo

Específicamente, la categoría “uso de suelo” evalúa tanto el uso de suelo como su cambio. En términos de ACV se hace referencia a los conceptos de “cambio y uso de suelo” como “transformación y ocupación de suelo” y se expresan en m² y m²/años, respectivamente (Taelman et al., 2016).

Los impactos del uso del suelo se pueden aclarar siguiendo el mecanismo de causa-efecto según se muestra en la figura 1.

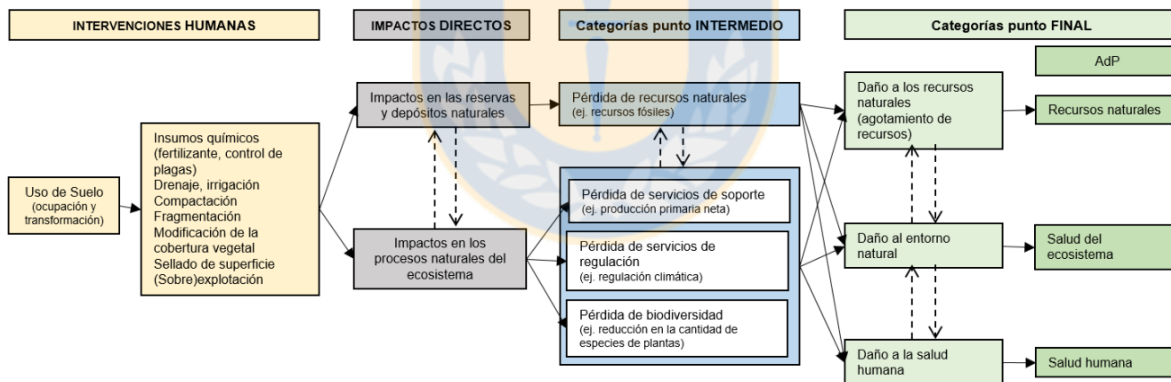


Figura 1: Cadena de causa-efecto de la ocupación del suelo y su transformación.

Fuente: Taelman et al. (2016).

Como se evidencia, los principales impactos del uso de suelo se relacionan con las perturbaciones realizadas por las actividades humanas, como la modificación de la cobertura vegetal, el drenaje y la irrigación, el uso de sustancias químicas, el sellado de la superficie, la compactación y fragmentación del suelo y la (sobre) explotación de los recursos. Dichas perturbaciones implicarían impactos directos sobre las

reservas y depósitos naturales y/o sobre los procesos naturales del ecosistema, los cuales se encuentran interrelacionados.

Los impactos sobre las reservas y depósitos naturales se pueden cuantificar a través de la pérdida de los recursos naturales, como combustibles fósiles, minerales, agua, etc. En cambio, los impactos ocasionados a los procesos naturales del ecosistema se pueden cuantificar basándose en distintos tipos de pérdidas; de servicios de soporte – como la producción primaria neta (PPN) –, de servicios de regulación – como la regulación del clima –, o de biodiversidad – como la reducción en la cantidad de especies de plantas –. Dichas pérdidas corresponden a distintas categorías de punto intermedio.

Las pérdidas mencionadas anteriormente son las consecuencias de impactos directos en el mediano plazo (categorías de punto intermedio), las que podrían generar daños en el largo plazo (categorías de punto final) hacia los recursos naturales, al entorno natural o a la salud humana, afectando las Áreas de Protección (AdP), áreas de interés para el ser humano para proteger o sostener (Taelman et al., 2016). Es así como las intervenciones humanas en el suelo producen impactos directos sobre la naturaleza, provocando pérdidas en el ecosistema en el corto plazo y daños al largo plazo sobre el ser humano y/o el medio ambiente.

2.5. Indicadores del impacto del uso de suelo

En cuanto a los indicadores de las categorías de punto intermedio, como el uso de suelo, la figura 1 expone algunos ejemplos; los recursos fósiles, la producción primaria neta, la regulación del clima y la reducción de la cantidad de especies de planta. Dichos indicadores evalúan las causas del impacto y el daño por el uso de suelo sobre las AdP. Precisando sobre la categoría uso de suelo, la tabla 1 muestra los principales indicadores del impacto del uso de suelo sobre la salud del ecosistema y sobre los recursos naturales.

Tabla 1. Indicadores para determinar el impacto del uso del suelo en el contexto de ACV, referencias, fundamento y categoría de daño impactada.

Indicadores	Referencias	Fundamento	Categoría de daño
Biodiversidad	<p>Goedkoop et al. (2009)</p> <p>Koellner & Scholz (2008)</p> <p>Frischknecht & Büsler Knöpfel (2013)</p> <p>Weidema & Lindeijer (2001)</p> <p>Geyer et al. (2010)</p> <p>De Baan et al. (2015)</p> <p>Souza et al. (2013)</p>	<p>Variación genética, ecosistémica o en número de especies (pérdidas). Riquezas de especies plantas vasculares.</p> <p>Matriz de hábitat apropiado, relacionando especies de vertebrados terrestres nativos con tipos de hábitats.</p>	Salud del ecosistema
Regulación de la erosión y del agua dulce, purificación del agua.	<p>Saad et al. (2011)</p> <p>Saad et al. (2013)</p>	Toneladas de suelo erosionado ha-1 año-1), capacidad de intercambio catiónico, tasa de flujo de agua y tasa de recarga de agua.	
Calidad del suelo	<p>Milà i Canals et al. (2007a)</p> <p>Brandão et al. (2001)</p>	Cambio de carbono orgánico del suelo.	
Regulación climática.	Müller-Wenk and Brandão (2010)	Toneladas de combustión-fósil-equivalente de C ha-1.	

Regulación de la erosión	Núñez et al. (2013)	Pérdida de la producción primaria neta.	
Ciclo del agua	Maes et al. (2009)	Evapotranspiración de la vegetación potencial natural (VPN).	
Suelo	Núñez et al. (2013)	Energía solar requerida para regenerar el suelo.	Recursos naturales
Biomasa natural	Dewulf et al. (2007)	Exergía solar metabolizada dentro de la vegetación natural.	
	Brandão and Milà i Canals (2013)	Cambio de carbono orgánico del suelo.	
	Alvarenga et al. (2013b) Taelman et al. (2014) Alvarenga et al. (2015)	Pérdida de la producción primaria neta (NPP).	

Fuente: Taelman et al. (2016).

Como se muestra en la tabla 1, la biodiversidad, fundamentada en la pérdida de especies de plantas, es el indicador más utilizado para evaluar los impactos sobre la salud del ecosistema (Goedkoop et al., 2009; Koellner & Scholz, 2008; Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013; Weidema & Lindeijer, 2001). Además, existen otros indicadores relacionados a la misma AdP, tales como:

- La purificación del agua y la regulación de la erosión y del agua dulce, fundamentadas en las toneladas de suelo erosionado y en la tasa de flujo de agua, entre otros (Saad et al., 2011; Saad et al., 2013).
- La calidad del suelo, fundamentado en el cambio de carbono orgánico del suelo (Milà i Canals et al., 2007a; Brandão et al., 2001).

- La regulación del clima, basado en las toneladas de combustión-fósil-equivalente de carbono (Müller-Wenk and Brandão, 2010).
- Regulación de la erosión, pero esta vez fundamentada en la pérdida de producción primaria neta (Núñez et al., 2013).
- El ciclo del agua, fundamentado en la evapotranspiración de la vegetación potencial natural (Maes et al., 2009).

Con respecto a la categoría de recursos naturales, en el contexto de ACV se pueden utilizar los siguientes indicadores:

- El suelo, fundamentado en la energía solar requerida para ser regenerado (Núñez et al., 2013).
- La biomasa natural, fundamentada principalmente por la pérdida de PPN (Alvarenga et al., 2013b; Taelman et al., 2014; Alvarenga et al., 2015)

Diversos estudios (Haberl et al., 2007; Alvarenga et al., 2013b, 2015; Taelman et al., 2014, 2016, entre otros) han utilizado la pérdida de PPN como indicador de la intensidad del uso de suelo, debido a las propiedades que la PPN presenta.

2.6. Producción Primaria Neta (PPN)

La PPN se define como la diferencia entre la energía o cantidad de carbono absorbida por las plantas mediante la fotosíntesis y la propia respiración de la planta, expresada en kg C/m² año (Haberl et al., 2007). Depende tanto de factores naturales – como el tipo de vegetación, condiciones climáticas, fertilidad del suelo, geografía del lugar, radiación solar absorbida, disponibilidad de agua, etc. – como de antrópicos – como el uso que el ser humano le dé al suelo, utilización de fertilizantes, cantidad de riego, etc.-.

Taelman et al. (2016) proponen la PPN como un buen punto de partida para determinar el posible impacto del uso de suelo sobre la salud del ecosistema, debido a una serie de propiedades:

- Se relaciona con el suministro de productos y servicios hacia los seres humanos (Erb et al., 2009).
- Se considera como un buen indicador de punto intermedio para el impacto sobre los procesos de soporte y de regulación del ecosistema (Beck et al., 2010; Goedkoop et al., 2009; Langlois et al., 2014; Weidema and Lindeijer, 2001).
- Mide la energía química almacenada que está disponible para los consumidores en el ecosistema, la cual está controlada por factores físicos, ambientales y bióticos (Taelman et al., 2016).
- Cualquier daño producido generaría un serio impacto a nivel global, puesto que diversos aspectos del funcionamiento del ecosistema dependen de la cantidad de energía trófica disponible para ser transferida desde las plantas hacia los otros niveles de la red del ecosistema (MEA, 2005).

La PPN se incluye en un innovador concepto creado por Haberl et al. (2007), denominado Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (AHPPN), indicador que evalúa la intensidad del uso de suelo relacionando procesos naturales con procesos socioeconómicos (Zhang et al., 2018; Taelman et al., 2016; Alvarenga et al., 2015; Erb et al., 2009). La AHPPN fue definida como la diferencia entre la PPN potencial, es decir, la PPN en ausencia del ser humano (PPN_0) y la fracción de PPN remanente en el ecosistema posterior a la cosecha (PPN_r) según se muestra en la figura 2. La PPN_r considera la PPN remanente tanto en la superficie del suelo (aérea, PPN_a) como la que quedó debajo de este (subterránea, PPN_s) y se obtiene restando la PPN cosechada o destruida durante la cosecha (PPN_c) con la PPN de la vegetación que prevalece en la actualidad (PPN_{act}). En otras palabras, la AHPPN se define como la suma de PPN_c y de PPN_{ts} , que corresponde al impacto de las transformaciones del suelo inducidas por el humano sobre la PPN (cambio en el uso y cobertura de suelo y degradación de suelo), como se ilustra en la figura 2.

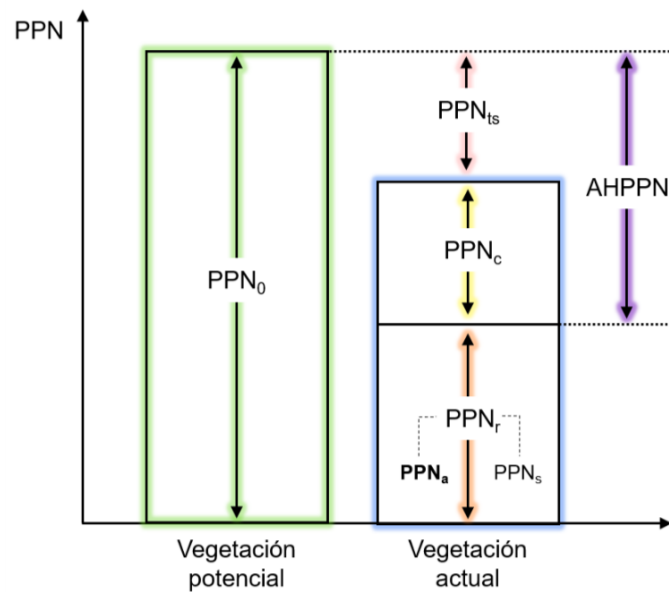


Figura 2. Componentes de la AHPPN según Haberl et al. (2007). PPN₀: PPN en ausencia del ser humano; PPN_{ts}: cambios en la PPN inducidos por el humano; PPN_c: PPN cosechada o destruida durante la cosecha; PPN_r: PPN remanente en el ecosistema posterior a la cosecha. PPN_a: PPN aérea, sobre la superficie del suelo; PPN_s: PPN subterránea, bajo la superficie del suelo.

Fuente: Erb et al. (2009).

La utilización de la PPN es cada vez más frecuente; Zhang et al. (2018) cuantificaron las influencias antropogénicas en los ecosistemas naturales del Tíbet utilizando la AHPPN como indicador y Medková et al. (2017) estimaron la cantidad de PPN apropiada por las tierras de cultivo a nivel global, entre otros. Las reservas de carbono aéreas (PPN aérea) también se han utilizado para determinar la intensidad del uso de suelo; Pellikka et al. (2018) estudiaron el impacto del cambio de uso de suelo en Kenia cuantificando el carbono aéreo proveniente de los árboles y Erb et al. (2018) cuantificaron las reservas de carbono (considerando las aéreas) globales de la vegetación actual y potencial.

Si bien se ha comprobado que el cuantificar la apropiación de la PPN y el determinar las cantidades de carbono aéreas con el fin de evaluar el impacto del uso de suelo entrega resultados confiables, implementar estos modelos en la metodología ACV resulta ser complicado pues solo visualizan las cantidades de carbono y su

movimiento entre lo cosechado, lo actual, lo remanente, etc., pero no considera la eficiencia del suelo, en relación al potencial de trabajo útil que posee. En este sentido, el concepto de exergía juega un rol importante en la determinación de la eficiencia y calidad del uso de los recursos.

2.7. PPN en términos de exergía

Por definición, la exergía (ex) de un sistema o recurso es la máxima cantidad de trabajo útil que puede ser obtenido desde dicho sistema o recurso cuando este alcanza un equilibrio con sus alrededores a través de procesos reversibles en donde el sistema solo puede interactuar con el ambiente (Dewulf et al., 2008). Basado en la Segunda Ley de la Termodinámica y a diferencia de la energía, la exergía considera las irreversibilidades del sistema (pérdidas), por lo que la exergía que entra (exergía_{en}) no es igual a la que sale (exergía_{sal}), como se ve en la figura 3.

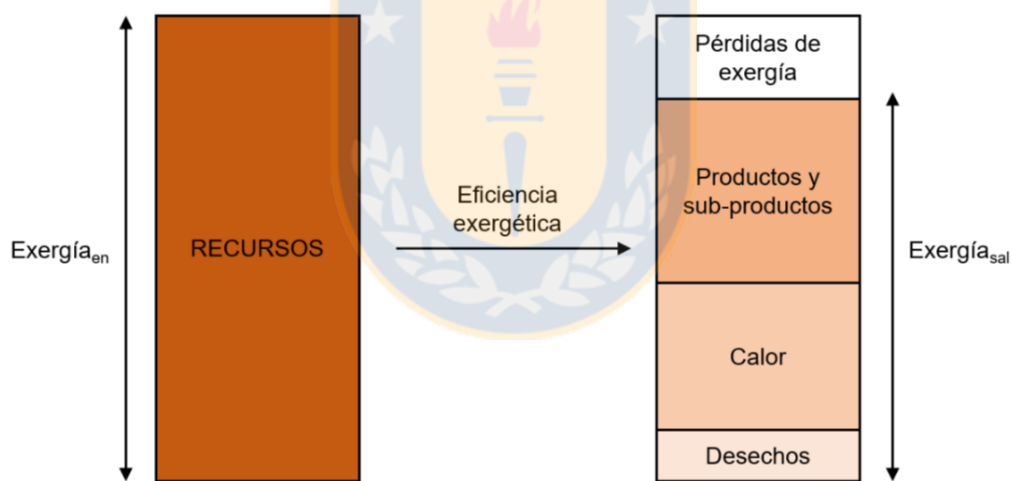


Figura 3. Proceso de transformación en términos de exergía.

Fuente: Dewulf et al., 2008.

La figura 3 muestra el proceso de transformación de ciertos recursos a productos y subproductos, calor, desechos y pérdidas de exergía. Se aprecia cómo el contenido exergético de los recursos disminuye debido a pérdidas exergéticas disipadas en el entorno. Es así como la exergía evalúa la calidad de un recurso, representando el límite superior de la porción del recurso que puede convertirse en trabajo (Dewulf et al., 2007).

Los análisis exergéticos se han utilizado para análisis técnicos (detección de ineficiencias), de sustentabilidad en la industria, termoeconómicos y ambientales (Dewulf et al., 2008). Incluso se ha podido insertar en la metodología ACV, donde se han propuesto distintos métodos para contabilizar el consumo acumulado de los recursos de forma estandarizada, es decir, todos los recursos en cuestión poseen la misma unidad de medida (en términos de MJ_{ex}) permitiendo visualizar los recursos materiales, energéticos y el mismo suelo como un todo (Boesch et al., 2007; Dewulf et al., 2007; Liao et al., 2012).

Para la contabilización de los recursos existen diversos métodos, tales como la Demanda Acumulada de Exergía (CExD) y la Extracción Acumulada de Exergía desde el Entorno Natural (CEENE). La primera se define como la suma de la exergía de todos los recursos requeridos en un proceso o producto (Boesch et al., 2007), pero no contabiliza al suelo como recurso. En cambio, la segunda cuantifica la exergía extraída o privada del entorno natural (Dewulf et al., 2007) considerando al suelo como recurso. Por lo demás, posee tres versiones (v2007, v2013 y v2014), como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Metodologías basadas en exergía para contabilizar recursos.

Consideraciones	CEENE v2007	CEENE v2013	CEENE v2014
Evaluar todo tipo de recursos.	X	X	X
Unidad de medida estandarizada.	X	X	X
Diferenciación espacial		X	X
Sistemas marinos.			X

Fuente: elaboración propia a partir de información de Dewulf et al. (2007), Alvarenga et al. (2013b) y Taelman et al. (2014).

El objetivo de CEENE v2007 era establecer un método integral de análisis de ciclo de vida permitiendo evaluar todo tipo de recursos, desde combustibles fósiles hasta renovables (incluyendo al suelo como recurso). Además, todos los recursos fueron

expresados en la misma unidad de medida, aspecto que permitió visualizar todos los recursos en conjunto (MJ_{ex}).

La siguiente versión, CEENE v2013, consideró las variaciones espaciales de cada región en función de sus características específicas. Planteó la diferenciación espacial por medio de la creación de FC sitio-genéricos y sitio-específicos, los cuales evalúan el impacto sobre la calidad del suelo, entre otros factores.

Finalmente, en CEENE v2014 se agregaron los sistemas marinos, logrando contabilizar los impactos ambientales de la ocupación de superficies marinas.

En CEENE v2013 se combinaron las potencialidades de la exergía, como cuantificador de la calidad de los recursos, con la PPN, como indicador regional de los impactos del uso de suelo. Se crearon FC a nivel país (163 países, incluyendo a Chile) y a nivel regional para los 6 países con mayor superficie a nivel mundial (Rusia, Canadá, China, Estados Unidos, Brasil y Australia), todos en términos de MJ_{ex}/m^2 año (Alvarenga et al., 2013b). Dichos FC fueron determinados a partir de la PPN_0 determinada por Haberl et al. (2007) y de la creación de un factor de conversión biomasa-exergía de $42,9 MJ_{ex}/kg C$, el cual se calculó utilizando 13 de los 14 biomas de Olson et al., (2001).

Los estudios realizados por Alvarenga et al. (2013b) calcularon un FC para Chile de $14,7 MJ_{ex}/m^2$ año. Sin embargo, el país posee una vasta diversidad paisajística, considerando glaciares, desiertos, bosques siempre verdes y plantaciones forestales, entre otros, por lo que el FC calculado podría estar sobre o subestimado, dependiendo de la zona en cuestión, debido a que se esperan diferencias en la PPN de cada región del país. Por ejemplo, la Región de Atacama se destaca por su árido desierto, lo que implicaría que su PPN fuese considerablemente menor que si se comparara con la Región del Biobío, la cual se caracteriza por presentar grandes superficies de plantaciones forestales. A partir de lo cual, se puede decir que el valor reportado para Chile no refleja las realidades socioeconómicas, climatológicas y vegetacional de cada región del país.

3. METODOLOGÍA

Para lograr analizar el efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea en términos de exergía, se realizaron los pasos ilustrados en la figura 4.

Objetivo 1	Describir caso de estudio
	Definir categorías de uso de suelo
	Realizar matriz de transición
Objetivo 2	Obtener espacialmente la PPN _a en kg C/m ² año
	Correlacionar la PPN _a para cada categoría de uso de suelo (g C/año)
Objetivo 3	Calcular la PPN _a en MJ _{ex} /m ² año
	Correlacionar la PPN _a para cada categoría de uso de suelo (MJ _{ex} /m ² año)
Objetivo 4	Estimar la transición de la PPN _a debido al cambio de uso de suelo
	Analizar el efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN _a en términos de exergía

Figura 4. Actividades a seguir basadas en los objetivos planteados.

Fuente: elaboración propia.

3.1. Cambio de uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble

Para analizar el cambio de uso de suelo, se describió el área de estudio, se definieron categorías de uso de suelo y se realizaron matrices de transición.

3.1.1. Descripción del caso de estudio

El área a estudiar corresponde a la antigua región del Biobío, la que en septiembre de 2018 se dividió en dos conformando las regiones de Ñuble y del Biobío (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2018). Por motivos de disposición de datos, en el presente estudio se consideró el área que abarcan ambas regiones.

La zona de estudio se localiza entre los 36°00 y 38°30' de latitud sur y posee una superficie de 37.093 km², representando el 4,9% del territorio nacional continental

(Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2018). De Oeste a Este, las principales características geomorfológicas corresponden a planicies litorales, Cordillera de la Costa, depresión intermedia, Precordillera y Cordillera de los Andes, como se ilustra en la figura 5.

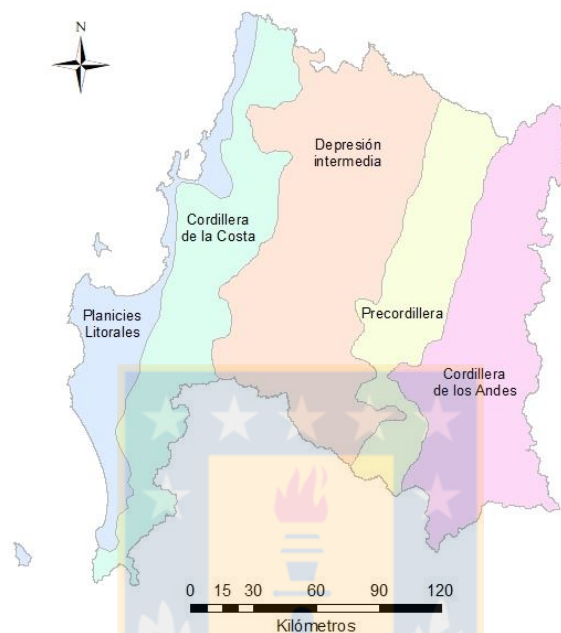


Figura 5. Características geomorfológicas del área de estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de educarchile (2018).

Climáticamente se define como una zona de transición entre un clima templado mediterráneo cálido y un clima templado húmedo o lluvioso, lo que da pie a la proliferación de una vasta gama de vegetación que consta de praderas, matorrales y bosques. Además, de los tipos vegetacionales ya mencionados, se pueden encontrar distintos usos de suelo, tales como terrenos agrícolas, áreas desprovistas de vegetación, cuerpos de agua, nieves y glaciares y, humedales, presentados en la figura 6.

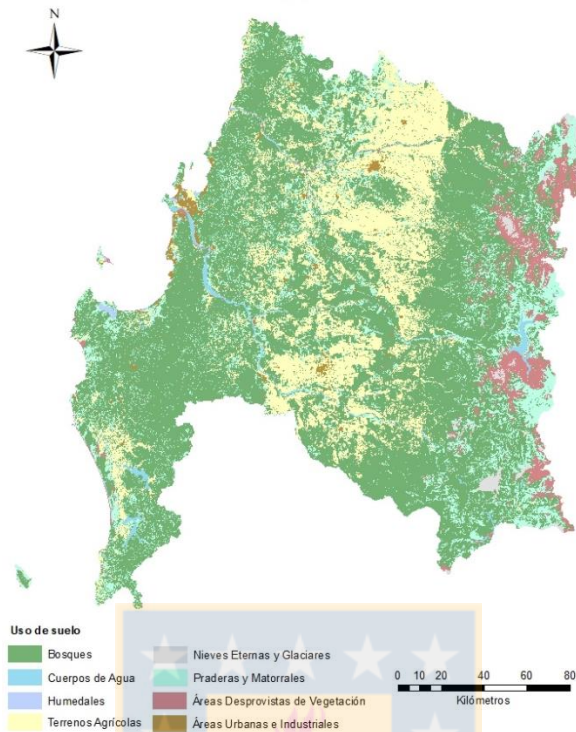


Figura 6. Usos de suelo del área de estudio

Fuente: elaboración propia a partir de datos de CONAF (2015).

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) brinda información del uso de suelo de Chile para los años 1994, 2007 y 2015. Para el 2015, el uso que abarcaba la mayor superficie del área de estudio eran los bosques, destacando las plantaciones forestales, seguido de los terrenos agrícolas y, en último lugar, los humedales (ver anexo 1).

3.1.2. Definición de categorías de usos de suelo

En 1994 la CONAF registró por primera vez los distintos usos de suelo existentes, los que luego fueron actualizados por la misma institución en 2007 y 2015. Las actualizaciones fueron aumentando su nivel de detalle, identificando usos y sub-usos de suelo. Es por esto que para realizar una comparación adecuada fue necesario homologar las categorías (terrenos agrícolas, matorrales, etc.), revisando las categorías de los años en cuestión y reclasificándolas en categorías más

generales, definidas principalmente por su estructura vegetal (para mayor información, ver anexo 2).

Las categorías generadas fueron las siguientes: áreas sin vegetación, áreas urbanas e industriales, cuerpos de agua, praderas, matorrales, terrenos agrícolas, humedales, bosque nativo, plantación y nieves. El bosque nativo fue subdividido en adulto y renoval puesto que presentan importantes diferencias en su estructura y tamaño según el criterio de expertos.

La información dispuesta por CONAF se encuentra disponible de forma gratuita en su página web (<https://sit.conaf.cl/>). Una vez descargada la información y definidas las categorías, se ingresaron al software ArcGIS 10.4 y, se reclasificaron los usos según las nuevas categorías por medio de la creación de un nuevo campo en la tabla de atributos de cada capa. La homologación de las categorías permite la creación de las matrices de transición.

3.1.3. Creación de matriz de transición

Una matriz de transición es una tabla simétrica de doble entrada (Aguayo et al., 2009) que, en este caso, presenta la dinámica del cambio de uso de suelo de dos años distintos, contrastando la información de cada uno. Como los datos de uso de suelo provienen de 3 años diferentes, se realizaron 3 matrices abarcando los períodos 1994-2007 (matriz 1), 2007-2015 (matriz 2) y 1994-2015 (matriz 3), como se muestra en la figura 7.

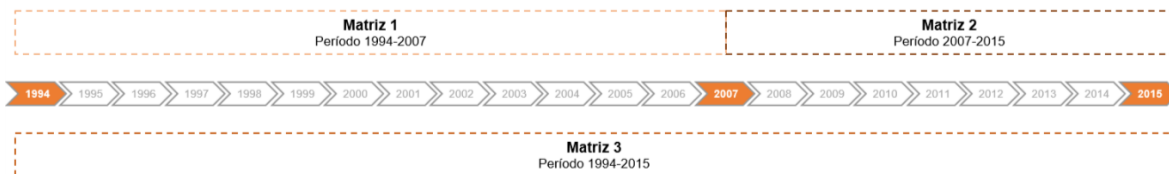


Figura 7. Períodos de tiempo de las matrices de transición.

Fuente: elaboración propia a partir de información de CONAF.

Como las matrices de transición analizan las superficies de cada uso de suelo, es necesario que en los tres años estudiados la superficie total de área de estudio sea

igual. No obstante, debido a factores como el desarrollo tecnológico y/o a diferentes técnicas utilizadas en la obtención de cada catastro, la información proporcionada por CONAF posee superficies distintas. Es por ello que se corrigieron las superficies de 1994 y de 2007, tomando como referencia la del año 2015 por ser la última actualización y por ende cuenta con información de mayor precisión.

Una vez igualadas las superficies se procedió a realizar las matrices de transición utilizando ArcMap nuevamente, por medio de la herramienta “área tabulada”.

Por otro lado, la tasa de cambio para cada categoría de uso de suelo se calculó mediante la siguiente expresión (eq. 1) (Aguayo et al., 2009):

$$T = \frac{100}{t_2 - t_1} * \ln\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (1)$$

donde, t1 y t2 son los tiempos estudiados (años) y S1 y S2 las superficies respectivas (m²).

3.2. PPN aérea en términos de g C/año por uso de suelo

Para obtener la PPN aérea de las regiones del Biobío y Ñuble por cada uso de suelo, en primer lugar, se utilizaron imágenes satelitales obtenidas por MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) y, en segundo lugar, se establecieron las reservas de carbono aéreas con los distintos usos de suelo y sus respectivos cambios.

3.2.1. Obtención de PPN aérea en términos de kg C/m² año

El sensor “espectroradiómetro para imágenes de resolución moderada” o MODIS, por sus siglas en inglés, fue creado por la NASA con el fin de observar de forma continua los cambios globales, incluyendo el estudio integrado de la atmósfera, de los océanos y de la superficie terrestre (Mas, 2011). El sensor se encuentra a bordo de dos satélites los cuales monitorean la totalidad de la superficie terrestre en uno o dos días obteniendo imágenes brutas y procesadas que son almacenadas y dispuestas en internet de forma gratuita. La información obtenida es procesada y transformada en distintos tipos de productos (nubosidad, índices vegetacionales,

cobertura de suelo, PPN, etc.) divididos en 4 niveles (0 – 4) según el grado de procesamiento realizado. La productividad primaria se encuentra en el último nivel puesto que para su cálculo se requiere de información determinada en los niveles anteriores, como las coberturas del suelo y el índice de área foliar, entre otros. La información se encuentra disponible de forma continua en la página web de la NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) a partir del año 2000, con una resolución espacial y temporal de 1 km y 8 días, respectivamente, y en la unidad de medida de kg C/m².

Los modelos basados en la teledetección utilizan el concepto de “eficiencia del uso de la luz” (LUE, por sus siglas en inglés), es decir, cuánta luz es transformada de forma efectiva a carbono fijo (Gitelson y Gamon, 2015), el cual define en gran medida la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR, por sus siglas en inglés) por la vegetación. Los modelos basados en LUE asumen una tasa de asimilación relativamente constante de carbono por unidad de APAR (Ardö 2015). La APAR depende de la duración e intensidad de la radiación solar (la cual depende de la ubicación geográfica y de la atmósfera) y de la cantidad y geometría de las hojas de las plantas, resultando ser la base para la estimación de la PPN. En teoría, la APAR corresponde al producto entre la radiación fotosintéticamente activa entrante y la fracción absorbida de la radiación fotosintéticamente activa (FAPAR, por sus siglas en inglés), la cual se determina por medio de imágenes de percepción remota, como MODIS. La tasa LUE se expresa como g C MJ⁻¹ APAR lo que quiere decir que MODIS, al basarse en dicho concepto, determina el carbono existente sobre la superficie terrestre (carbono aéreo) y no considera el carbono bajo tierra, como el que se encuentra en las raíces de las plantas.

Como MODIS entrega directamente la PPN anual y considerando que la información se encuentra disponible desde el año 2000 hasta el 2014, se descargó la PPN del 2000, 2007 y 2014, como se ve en la figura 8.

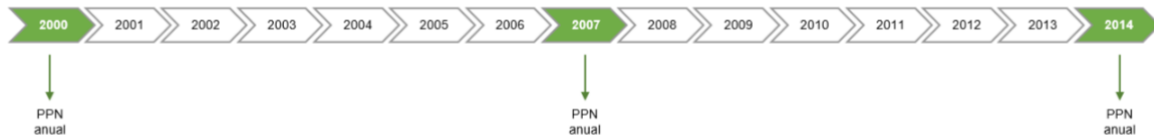


Figura 8. Años en los cuales se obtuvo la PPN aérea por medio de MODIS

Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Correlación de PPN aérea por uso de suelo (g C/año)

Considerando que la información de uso de suelo proviene de 3 años diferentes y que la PPN está disponible desde el 2000 hasta el 2014, se vinculó el uso de suelo con la PPN más cercana temporalmente. La figura 9 muestra los vínculos entre el uso de suelo de CONAF y la PPN aérea de MODIS.

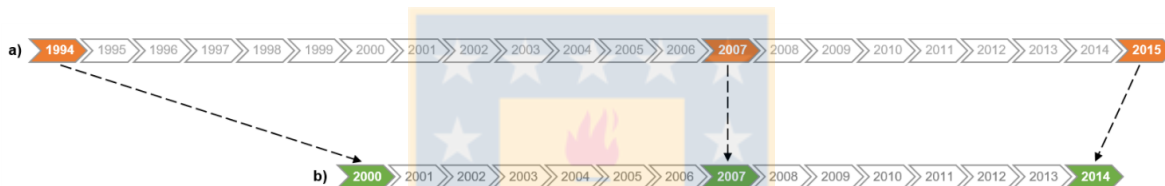


Figura 9. Correlación entre usos de suelo y PPN aérea, según información disponible. a) datos de uso de suelo y b) datos de PPN.

Fuente: elaboración propia.

Así, se vinculó la información de 1994, 2007 y 2015 de CONAF con la PPN aérea de 2000, 2007 y 2014, respectivamente, obteniendo los cambios de PPN aérea debido a las transiciones de los usos de suelo en términos de Tg C/año.

3.3. Estimación de PPN aérea en términos de exergía por uso de suelo

Utilizando ArcMap se calculó la PPN en términos de exergía y se correlacionó con el uso de suelo de la ex-región del Biobío, con el fin de determinar la eficiencia del uso de suelo de cada tipo de uso de suelo.

3.3.1. Cálculo de PPN en términos de MJ_{ex}/m² año.

Los valores obtenidos mediante MODIS (kg C/ m² año) se multiplicaron por 42,9 MJ_{ex}/kg C, factor de conversión determinado por Alvarenga et al. (2013b) para así

obtener la PPN promedio anual en términos de exergía por uso de suelo para los tres años estudiados, como se ilustra en la siguiente expresión (eq. 2):

$$\text{PPN (kg C/m}^2 \text{ año)} \times \text{factor de conversión (MJ}_{\text{ex}}/\text{kg C)} = \text{PPN (MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2 \text{ año)} \quad (2)$$

3.3.2. Correlación de PPN aérea por uso de suelo (MJ_{ex}/m² año)

Se correlacionó la PPN aérea con los usos de suelo registrados (en términos de MJ_{ex}/m² año), para así determinar los usos con mayores y menores eficiencias en el uso de suelo, además de la variación temporal por uso de suelo.

3.4. Estudio del efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea (MJ_{ex}/m² año)

Por medio de ArcMap y Excel, se determinó la dinámica de la PPN aérea debido al cambio de uso de suelo y su efecto sobre la productividad del uso de suelo en términos de exergía.

3.4.1. Estimación de la transición de PPN aérea debido al cambio de uso de suelo

La matriz de transición realizada anteriormente se utilizó para determinar los cambios de productividad aérea, provocados por el cambio de uso de suelo, en los períodos 2000-2014, 2000-2007 y 2007-2014. Se calculó el porcentaje de variación de productividad por cada transición de uso de suelo, así como de las superficies que no sufrieron cambios de uso de suelo.

3.4.2. Análisis del efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea en términos de exergía

Una vez obtenidas las variaciones de PPN aérea, se determinó el efecto (positivo, negativo o nulo) del cambio de uso de suelo sobre la eficiencia del uso de suelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis espacial y temporal de los cambios de uso de suelo

En el presente estudio se evaluó la transición del cambio de uso de suelo en las regiones de Biobío y Ñuble para los períodos 1994-2007, 2007-2015 y 1994-2015, los que se visualizan en la figura 10.

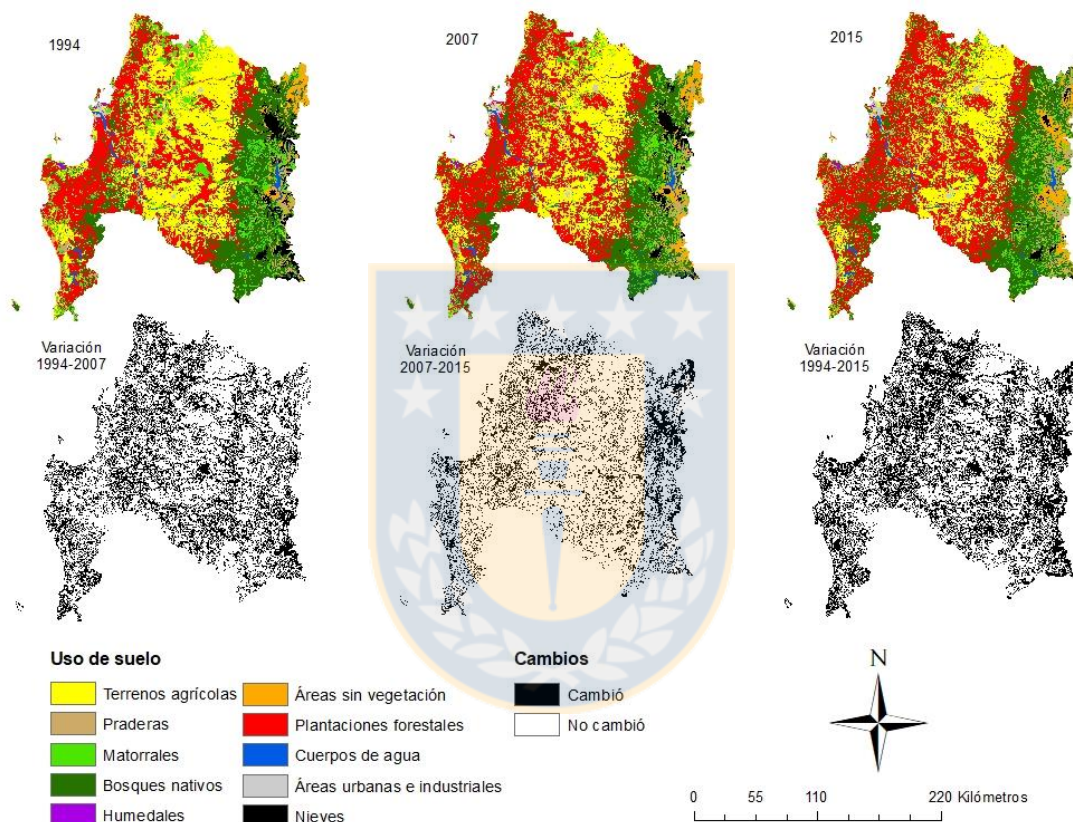


Figura 10. Dinámica del uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble. Se ilustra el uso de suelo de 1994, 2007 y 2015 y la variación entre dichos años.

Primer período: 1994-2007

En el primer periodo se destaca el aumento de las plantaciones forestales en la Cordillera de la Costa y en la depresión intermedia, reemplazando a los terrenos agrícolas y matorrales (ver fig. 5 y fig. 10). La expansión forestal fue motivada por la recuperación de suelos, degradados por el uso intensivo de la agricultura; el

Estado chileno en 1974 incentivó la actividad forestal considerando “la importancia y necesidad que existe para la economía del país de fomentar la forestación” (DL 701/1974), reinsertando los suelos al sistema productivo. Estudios anteriores también han evidenciado la fuerte expansión forestal, básicamente por medio del monocultivo de eucalipto y pino insigne (Nahuelhual et al., 2012; Heilmayr et al., 2016). En este periodo se registró el mayor cambio de uso de suelo, prácticamente en la totalidad del área de estudio.

Segundo período: 2007-2015

En el segundo período la expansión forestal continua, pero en menor grado, estableciéndose sólidamente en la Cordillera de la Costa y en la Precordillera, sin mayores avances en la depresión intermedia. Uno de los factores que pudiera estar relacionado con el cese de la expansión forestal es la suspensión de las bonificaciones del DL 701/1974, a partir del 2013. Visualmente el cambio más significativo ocurrido en este período es la disminución del uso de suelo “nieves”, asociadas principalmente a los efectos del calentamiento global y por ende al Cambio Climático (IPCC, 2018; Pérez et al., 2018). Según el laboratorio de glaciología dirigido por Andrés Rivera, en el área de estudio existe el complejo de glaciares de Nevados de Chillán y los glaciares del Volcán Callaqui, los que efectivamente han disminuido $-0,36$ y $-0,14 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$, respectivamente, asociado al aumento de la temperatura y a explosiones volcánicas (Rivera y Bown, 2013). Asimismo, la superficie que cambió fue notablemente menor a la del primer período, concentrándose estos en la Cordillera de los Andes (pérdida de nieves).

Período global: 1994-2015

Desde el punto de vista global, la variación desde 1994 a 2015 ha sido significativa en la totalidad del área de estudio según la figura 10, destacándose la Cordillera de la Costa, la Precordillera y la Cordillera de los Andes por la expansión forestal y el derretimiento de nieves, explicado anteriormente. A nivel de detalle, la tabla 3 muestra las tasas de cambio, ganancias, pérdidas y cambios netos por uso de suelo.

Tabla 3. Tasa de cambio, ganancia, pérdida, cambio neto y de la superficie de cada uso de suelo entre 1994 y 2015.

Uso de suelo	1994 (ha)	%	2015 (ha)	%	Tasa (%)	Ganancia (ha)	Perdida (ha)	Cambio neto (ha)	%
Terrenos agrícolas	983.559	26,5%	714.919	19,3%	-1,5	151.777	420.417	-268.640	-27,3%
Praderas	166.756	4,5%	170.802	4,6%	0,1	125.764	121.718	4.046	2,4%
Matorrales	434.685	11,7%	345.785	9,3%	-1,1	242.242	331.142	-88.900	-20,5%
Bosque nativo renoval	632.665	17,1%	749.310	20,2%	0,8	389.924	273.279	116.645	18,4%
Bosque nativo adulto	181.368	4,9%	151.047	4,1%	-0,9	75.346	105.667	-30.321	-16,7%
Humedales	10.210	0,3%	11.188	0,3%	0,4	7.819	6.841	978	9,6%
Áreas sin vegetación	110.441	3,0%	169.329	4,6%	2,0	119.971	61.083	58.888	53,3%
Plantaciones forestales	989.738	26,7%	1.270.126	34,2%	1,2	553.881	273.493	280.388	28,3%
Cuerpos de agua	49.181	1,3%	55.252	1,5%	0,6	29.846	23.775	6.071	12,3%
Áreas urbanas e industriales	25.489	0,7%	41.402	1,1%	2,3	25.203	9.290	15.913	62,4%
Nieves	125.210	3,4%	30.142	0,8%	-6,8	11.467	106.535	-95.068	-75,9%
Total	3.709.302	100%	3.709.302	100%					

Las plantaciones forestales fueron el uso que más hectáreas ganó, incrementándose en 280.388 ha (28,3%, con respecto a su superficie en 1994), obteniendo una tasa de cambio de 1,2%. Por otro lado, el uso que sufrió las pérdidas más notorias fue el de nieves, disminuyendo en un -75,9% alcanzando la menor tasa de cambio (-6,8%). Si bien las nieves poseen el porcentaje más alto de pérdidas, en términos de hectáreas perdieron 95.068 ha, valor casi 3 veces inferior al del uso agrícola quien perdió 268.240 ha en total (-27,3% con respecto a su superficie anterior).

Las tasas de cambio, ganancias, pérdidas y cambios netos de los períodos 1994-2007 y 2007-2015 se encuentran detallados en las tablas 8 y 9 (respectivamente) del anexo 3. Se logra apreciar que el incremento del uso forestal se manifiesta con mayor intensidad en el primer período mencionado aumentando un 24,8%, mientras que en el segundo período solo aumentó un 2,8%. Este comportamiento se relaciona directamente con las legislaciones hacia el uso forestal. Por otro lado, las nieves disminuyeron un 28% en el primer período y un 67% en el segundo, demostrando su concordancia con la figura 10.

Con respecto a los bosques nativos, cabe señalar que según su estructura se distingue el bosque nativo adulto (BNA) y el bosque nativo renoval (BNR), los que, además, se diferencian en su productividad; la biomasa del BNR va en aumento a medida que los árboles del “bosque joven” crecen, disponiendo de energía para la cadena trófica, es decir, de PPN. En cambio en el BNA, si bien su biomasa es mayor, la energía producida se emplea principalmente para la respiración, obteniendo bajas cantidades de PPN (Mas et al., 2011).

En general, no se visualizan cambios significativos en el bosque nativo (ver fig. 10), pero sí existen diferencias puntuales entre el adulto y el renoval (ver anexo 3). Durante el período total (1994-2015) la superficie del BNR aumentó (18,4%) y la del BNA disminuyó (-16,7%), diferencia que se puede explicar debido a la mayor cantidad de biomasa que posee este último, utilizada principalmente para fines de

calefacción residencial. De hecho, la leña es la principal fuente de calefacción del área de estudio, donde el 72,9% de los hogares ubicados en esta zona usan la leña como medio de calefacción (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2016). Sin embargo, analizando los períodos 1994-2007 y 2007-2015, la disminución del BNA fue cada vez menor (-13,1% y -4,1%, respectivamente) y el aumento del BNR fue cada vez mayor (4,6% y 13,3%, respectivamente), como se ve en las tablas 8 y 9 del anexo 3. Esto se pudiera deber a la entrada en vigencia de la Ley forestal relacionada a la recuperación de bosque nativo y fomento forestal en 2008, la cual tiene como objetivos la protección, recuperación y mejoramiento de los bosques nativos (art 1° Ley 20.283).

4.2. Transición del cambio de uso del suelo

Analizando con mayor profundidad el período 1994-2015, los cambios de uso de suelo hacia otros usos se detallan en la matriz de transición mostrada en la tabla 4. Las columnas muestran los usos de suelo identificados y las filas detallan el porcentaje de superficie y el tipo de uso de suelo al que cambió, con respecto a la superficie en 1994. Las cifras en negrita muestran el porcentaje de superficie que se mantuvo como tal. Las matrices de los períodos 1994-2007 y 2007-2015 se encuentran en las tablas 10 y 11 del anexo 4.

Terrenos agrícolas

Más de la mitad de la superficie existente en 1994 (57%) no sufrió ningún tipo de transformación, evidenciando que un 43% cambió hacia otros usos de suelo. El cambio de uso de suelo dominante fue hacia el uso de plantaciones forestales, transformándose un 26% de lo existente en 1994. El cambio hacia los otros usos de suelo es prácticamente insignificante. Similares resultados se obtuvieron en Aguayo and Pauchard (2009), Aguayo et al. (2009) y Briones y Sepúlveda-Varas (2016), donde los terrenos agrícolas son reemplazados por las plantaciones forestales.

Tabla 4. Matriz de transición del cambio y uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble, período 1994-2015 (ha).

		Año 1994										
		Terrenos agrícolas	Praderas	Matorrales	Bosque nativo renoval	Bosque nativo adulto	Humedales	Áreas sin vegetación	P. Forestales	Cuerpos de agua	Áreas urbanas e industriales	Nieves
Año 2015	Terrenos agrícolas	57%	10%	11%	3%	0%	12%	2%	5%	9%	12%	0%
	Praderas	2%	27%	5%	3%	6%	12%	19%	1%	4%	1%	16%
	Matorrales	6%	11%	24%	10%	11%	8%	8%	6%	7%	5%	9%
	Bosque nativo renoval	7%	15%	20%	57%	33%	5%	13%	12%	6%	3%	13%
	Bosque nativo adulto	0%	5%	3%	6%	42%	1%	1%	1%	1%	0%	2%
	Humedales	0%	0%	0%	0%	0%	33%	0%	0%	1%	2%	0%
	Áreas sin vegetación	0%	6%	3%	4%	3%	10%	45%	1%	7%	1%	45%
	Plantación	26%	24%	31%	16%	4%	8%	4%	72%	12%	10%	0%
	Cuerpos de agua	1%	1%	1%	1%	0%	4%	2%	1%	52%	2%	0%
	Áreas urbanas e industriales	1%	1%	1%	0%	0%	7%	0%	1%	2%	64%	0%
	Nieves	0%	1%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	15%
Total 1994		983559 ha	166756 ha	434685 ha	632665 ha	181368 ha	10210 ha	110441 ha	989738 ha	49181 ha	25489 ha	125210 ha

Praderas y Matorrales

Ambos usos poseen un comportamiento bastante similar, perdiendo más de un 70% de su superficie. Nuevamente el cambio de suelo hacia el uso forestal fue el dominante (24% en praderas y 31% en matorrales). A diferencia del uso agrícola, los cambios hacia otros usos de suelo fueron más notorios, donde un 15% de las praderas y un 20% de los matorrales se transformaron en BNR y un 11% de las praderas y de los matorrales se transformaron en matorrales y en terrenos agrícolas, respectivamente. Similares resultados obtuvieron Díaz et al. (2011), quienes evidenciaron el abandono de terrenos agrícolas (en su mayoría praderas) donde los suelos abandonados, principalmente por su mala calidad, se transformaron en arbustos y en bosques secundarios o renovales (no necesariamente de forma secuencial).

Bosque Nativo

En primer lugar, un importante porcentaje del BNR (57%) se mantuvo tal cual, mientras que un 16% y un 10% de la superficie en 1994 se transformó a plantaciones forestales y matorrales, respectivamente. En segundo lugar, el BNA sobresale de los otros usos vegetacionales puesto que es el único uso con un bajo porcentaje de cambio hacia el uso de plantaciones forestales (solo un 4%). Considerando que los mayores cambios son hacia BNR con un 33% y que un 42% no sufrió transformaciones, la superficie de BNA que se mantuvo como bosque nativo (considerando BNR) fue de un 75%, seguido de un 11% que cambió hacia matorrales.

Cabe destacar que desde 1994 a 2015 la superficie de bosque nativo que permanece como tal va en aumento, como se evidencia en las tablas 8 y 9 del anexo 3, hecho que se relaciona con la entrada en vigencia de la Ley 20.283/2008. No obstante, en términos generales el aumento del bosque nativo (BNA y BNR) entre 1994 y 2015 no es significativo, ganando 86.524 ha lo que corresponde a apenas un

11% (ver tabla 3). Lo anterior coincide con los resultados de Manushevich y Beier (2016), puesto que señalan que la Ley 20.283/2008 no es eficiente, provocando un efecto limitado en los bosques nativos y destacando que los subsidios para las plantaciones forestales son mucho más atractivos.

Plantaciones forestales

Solo un 28% de la superficie existente en 1994 cambió hacia otros usos, resaltando un 12% a BNR. Las plantaciones lideran la cantidad de área que no sufrió cambios (72%), exhibiendo el efecto del incentivo forestal y, además, la importancia económica que adquirió el rubro forestal para la ex-región del Biobío. El área de estudio históricamente se ha ubicado en el primer lugar en exportaciones de productos forestales, en comparación con las otras regiones de Chile. Tanto así, que en el período 2015-2016, Chile exportó un total de US\$ 5,299 millones, de los cuales el 70% provenía de la ex-región del Biobío (DIRECON, 2018). Durante el 2017, la actividad forestal representó el 89% de la exportación anual regional, obteniendo poco menos de 4270 millones de dólares. Además, actualmente en la zona se concentra el 83% de la carga forestal de las exportaciones chilenas (CORMA, 2018).

Otros Usos de suelo

El 67% de la superficie de los humedales cambió hacia los otros usos, exceptuando nieves. El 45% de las áreas sin vegetación se mantuvo como tal, destacándose la transformación de un 19% hacia praderas y un 13% a BNR. Más de la mitad de los cuerpos de agua de 1994 se mantuvieron como tal y, un 12% se transformó a plantaciones. Un 36% de la superficie de las áreas urbanas cambió hacia otros usos, destacándose los terrenos agrícolas (12%) y las plantaciones (10%). Finalmente, tan solo un 15% de las nieves se mantuvo como tal desde 1994 hasta 2015 y, un 45% cambió a áreas sin vegetación, demostrando el efecto del calentamiento global (IPCC, 2018; Pérez et al., 2018).

Todos estos cambios de uso de suelo pueden traer consigo cambios estructurales en la actividad del suelo, perjudicando directamente uno de los principales servicios ecosistémicos; la productividad primaria neta. La PPN es un servicio básico muy importante para el ser humano, tanto así que el estudio realizado por Haberl et al. (2007) propuso la apropiación humana de la PPN como indicador socio-ecológico de la intensidad del uso de suelo, concepto que también utilizaron Erb et al. (2009) y Taelman et al. (2016). Asimismo, la directa relación entre el cambio de uso de suelo y las reservas de carbono en la vegetación ha sido corroborada por Erb et al. (2018) y Pellikka et al. (2018).

4.3. Correlación de la PPN aérea por uso de suelo (Tg C/año)

Como se explicó anteriormente, el uso de suelo juega un papel importante en la PPN (Haberl et al., 2007; Erb et al., 2009; 2018; Taelman et al., 2016; Pellikka et al., 2018). La productividad del suelo depende tanto de elementos naturales (radiación solar) como antrópicos (uso de suelo). En este contexto, se vinculó la información disponible de uso de suelos con la de PPN aérea (ver fig. 9). La figura 11 muestra la PPN aérea del 2000, 2007 y 2014 por uso de suelo en términos de Tg C/año, detallados en el anexo 5.

La dinámica de la PPN aérea para el BNA y las praderas se mantiene relativamente constante durante todo el periodo estudiado, obteniendo las menores productividades. Por otra parte, los matorrales muestran una disminución del 26% de su PPN aérea desde 2000 a 2007, evidenciándose posteriormente un incremento del 10% entre 2007 y 2014. Este comportamiento se puede justificar por el cese de la expansión forestal, evidenciado entre 2007-2015 (ver tabla 3).

Los terrenos agrícolas y el BNR poseen comportamientos opuestos entre 2000 y 2014; mientras que el primero presenta una tendencia decreciente con respecto a la cantidad de PPN, la tendencia del segundo es creciente. El aumento de la productividad del BNR pudiera estar estrechamente relacionado con la entrada en vigencia de la Ley 20.283/2008. Además, la significativa diferencia con el BNA

probablemente se deba a la ganancia de nuevos terrenos, como se demuestra en la tabla 3.

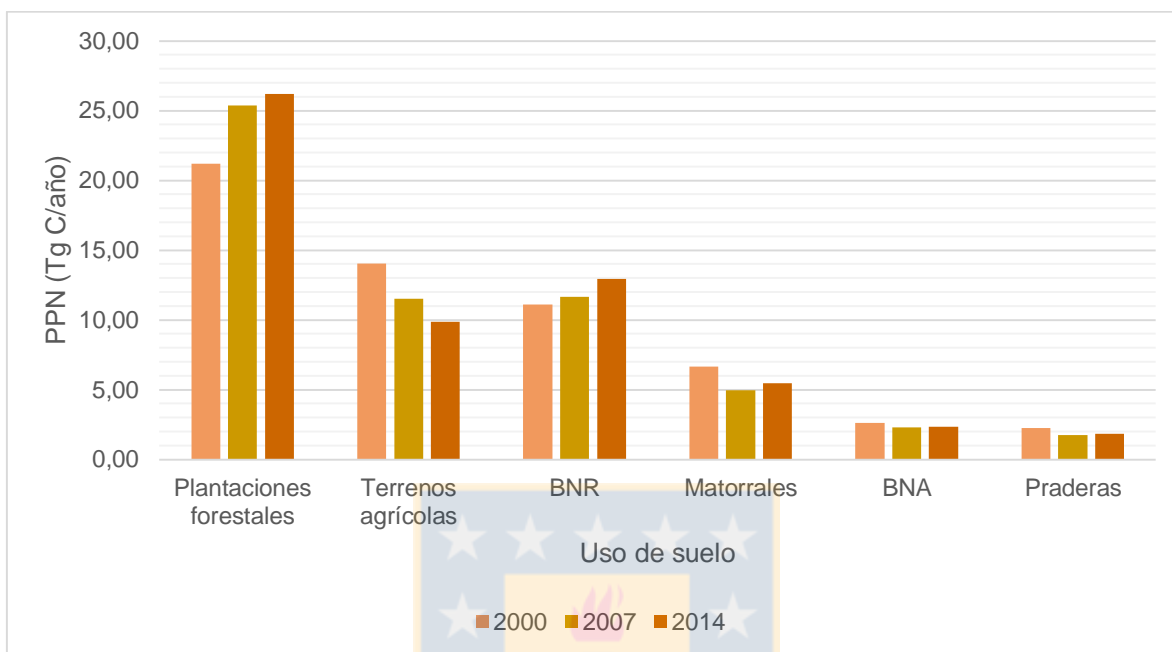


Figura 11. PPN aérea (Tg C/año) por uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble. Solo se muestran los usos que contienen vegetación.

Las mayores cantidades de PPN son aportadas principalmente por las plantaciones forestales debido a la vasta superficie que ocupan, la que incluso va en aumento a lo largo de los años. Asimismo, es de esperar que la productividad más alta se asocie a aquellos usos de suelo que presenten un manejo intensivo, relacionado principalmente a la importancia económica de la biomasa obtenida, como es el caso de las plantaciones. Los monocultivos son sistemas que presentan una marcada influencia antrópica (uso de fertilizantes, herbicidas, riego, poda y raleo, etc.) y que buscan obtener la máxima cantidad de biomasa útil, lo que explica que las cantidades de PPN obtenidas sean en promedio más de 3 veces superiores que la productividad de los boques nativos, sistemas naturales sin intervención antrópica.

Se podría decir que los valores obtenidos en el presente estudio (media de 0,063 Pg C/año, como se muestra en el anexo 6) son coherentes con los reportados por

Ardö (2015) y Erb et al. (2018), donde si bien dichos autores calculan valores muy superiores en términos de PPN, sus valores son a nivel de continente africano (10,3 Pg C/año) y mundial (450 Pg C/año), respectivamente. Es evidente que cuando los estudios se focalizan a escalas inferiores, las cantidades sean inferiores.

Por metro cuadrado ($\text{kg C/m}^2 \text{ año}$), los valores reportados en el presente estudio para plantaciones forestales (entre 2,06 y 2,15 $\text{kg C/m}^2 \text{ año}$) y bosques nativos (entre 1,46 y 1,77 $\text{kg C/m}^2 \text{ año}$) son similares con los reportados por Pellikka et al. (2018), quienes obtuvieron valores de 2,94 y 1,68 $\text{kg C/m}^2 \text{ año}$, respectivamente. Las mayores diferencias entre ambos estudios, pueden estar relacionadas a las características climáticas, de la vegetación existente de los suelos (nutrientes y disponibilidad de agua), entre otros factores. En contraste, los valores del presente estudio para los terrenos agrícolas y matorrales son casi 6 veces superiores a los reportados por Pellikka et al. (2018), quienes incluso reportaron valores nulos para praderas (mientras que el presente estudio estimó un valor de 1,27 $\text{kg C/m}^2 \text{ año}$ en

Dichas diferencias se deben al modelo utilizado, puesto que Pellikka et al. (2018) utilizaron ecuaciones alométricas, en cambio, el presente estudio utilizó un modelo basado en la teledetección. No obstante, el estudio de Baccini et al. (2017), el cual determinó la PPN aérea de los bosques tropicales a nivel mundial (425 Tg C/año) por medio de MODIS, obtuvo resultados coincidentes al del presente estudio, puesto que las variaciones (pérdidas/ganancias) de PPN aérea de ambos estudios oscilaban principalmente entre los -0,5 y 0,5 $\text{kg C/m}^2 \text{ año}$, aproximadamente.

Cabe destacar que las consideraciones metodológicas que el modelo MODIS presenta afecta significativamente los valores de PPN aérea Según plantea Ardö (2018), la presencia de nubes y aerosoles en el área de estudio contribuyen a falsear los resultados obtenidos. Es por esto que resulta fundamental determinar la calidad de los datos para comprobar el grado de confianza de los resultados.

4.4. Control de calidad de datos de PPN

La PPN aérea es determinada por MODIS por medio de imágenes satelitales, las cuales se basan principalmente en la fracción absorbida de la radiación solar fotosintéticamente activa (FAPAR) por la vegetación y el índice de área foliar (IAF), entre otros factores. Sin embargo, la obtención de FAPAR y de IAF depende de la nubosidad y de los aerosoles presentes en la atmósfera (Running y Zhao, 2015), por lo que se debe realizar un Control de Calidad (CC) de los datos.

El CC se basa en la cantidad de días (durante la época de crecimiento de la biomasa dentro de un año) donde el IAF y FAPAR se rellenaron artificialmente debido a la presencia de nubes y/o aerosoles (Ardö, 2015). Por lo tanto, mientras mayores sean los valores del CC, menor será la calidad de los datos. Cabe señalar que la época de crecimiento se define cuando la temperatura diaria mínima del aire está sobre los -8°C (Centro de Archivo Activo Distribuido de Procesos del Suelo, 2018).

La figura 12a muestra el porcentaje de días de baja calidad de datos (promedio entre 2000, 2007 y 2014). Se logra apreciar que gran parte del área de estudio, sobre todo el área abarcada por los terrenos agrícolas, posee porcentajes bajos, indicando información de buena calidad. Los porcentajes aumentan en el área del bosque nativo, áreas sin vegetación y en la zona Oeste de las plantaciones forestales, indicando mayor cantidad de nubosidad y/o aerosoles, lo que empobrece los datos. La figura 12b señala una calidad media de los datos (45%) para praderas, bosque nativo y plantaciones forestales, seguido de los matorrales (40%) y los terrenos agrícolas (30%), logrando los datos de mejor calidad.

Para los análisis siguientes, se debe considerar que la calidad de los datos obtenidos no es la óptima. Para reducir la incertidumbre del modelo se recomienda validar los resultados con datos de campo (Ardö, 2018) o con ecuaciones alométricas que permitan determinar la cantidad de carbono de la biomasa existente (Pellikka et al., 2018).

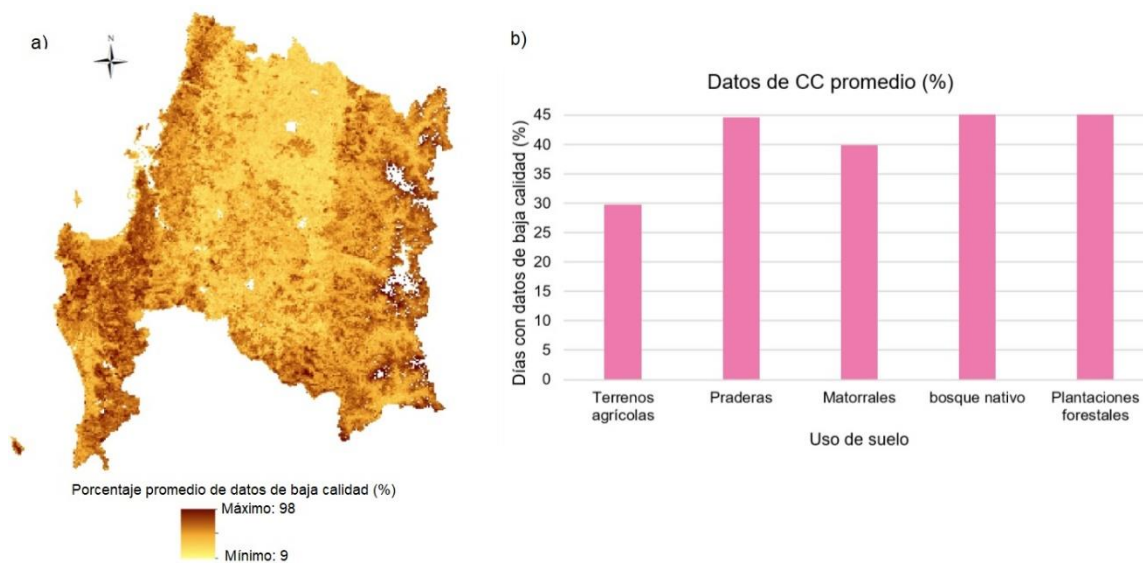


Figura 12. Datos de Control de Calidad (CC) extraídos de MODIS. a) Porcentaje anual de días con información de baja calidad durante la época de crecimiento (promedio de 2000, 2007 y 2014). b) Porcentaje de días de baja calidad de datos, por uso de suelo.

4.5. Análisis espacial y temporal PPN aérea en términos de exergía

Basándose en la PPN aérea y utilizando el factor de conversión biomasa-exergía determinado por Alvarenga et al. (2013b) ($42,9 \text{ MJ}_{\text{ex}}/\text{kg C}$), se determinó la exergía asociada a la productividad de las regiones del Biobío y Ñuble para los años 2000, 2007 y 2014 (resultados en términos de $\text{kg C}/\text{m}^2 \text{ año}$ en anexo 7).

La conversión de los flujos de carbono ($\text{kg C}/\text{m}^2 \text{ año}$) en términos de exergía ($\text{MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2 \text{ año}$) permite entender la eficiencia del suelo y la calidad de la biomasa cosechada, así como el potencial de los residuos para ser usados (Dewulf et al., 2008). En este caso, el contenido exergético de PPN representa la intensidad y la eficiencia con que una determinada superficie de suelo es usada. Mientras mayor sea la exergía de la PPN, mayor será la eficiencia del uso del suelo (Alvarenga et al., 2013b).

La distribución espacial de la PPN ($\text{MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2$ año) de las regiones del Biobío y Ñuble para los años 2000, 2007 y 2014, así como los cambios efectuados en los periodos 2000-2007, 2007-2014 y 2000-2014 se muestran en la figura 13..

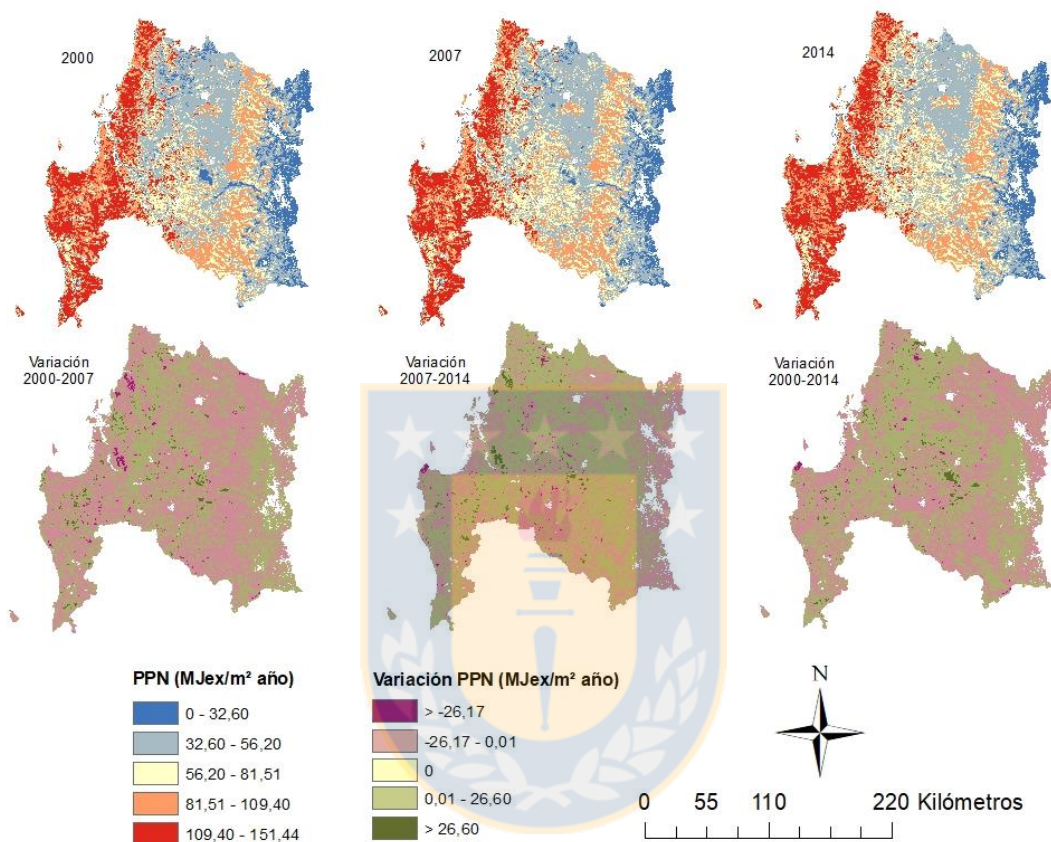


Figura 13. Georreferenciación de la PPN ($\text{MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2$ año) y sus variaciones en 2000-2007, 2007-2014 y 2000-2014.

La PPN del área de estudio oscila entre los 0 y los $151,44 \text{ MJ}_{\text{ex}}/\text{m}^2$ año, donde el mínimo corresponde a áreas sin biomasa, o sea, nula productividad, mientras que los valores máximos se deben a áreas con la mayor cantidad de vegetación, es decir, a las mayores eficiencias en la productividad.

La mayor eficiencia en el uso del suelo está relacionada con la distribución espacial de las plantaciones forestales, seguidas de los bosques nativos (ver fig. 10 y 12).

Cantidades inferiores de exergía se relacionan principalmente con los terrenos agrícolas y con los matorrales. Finalmente, las mínimas y nulas cantidades exergéticas se relacionan con las áreas sin vegetación, nieves y algunos matorrales (ubicados en sectores agrícolas), los que posiblemente registran una baja eficiencia debido a la degradación del suelo asociado a un uso intensivo del mismo, mencionado anteriormente. Similares patrones espaciales presentaron los estudios de Ardö (2015) y Baccini et al. (2017), donde las mayores cantidades de PPN se ubicaban en las zonas de mayor cantidad de vegetación.

Con respecto a la variación de PPN aérea, el área de estudio presenta pérdidas y ganancias de productividad detalladas en el anexo 8. Como se ve en la figura 13, el período 2000-2007 se caracterizó por obtener pérdidas de PPN (55% de los datos de variación eran negativos) y el 2007-2014, ganancias de PPN (59% de los datos eran positivos). La variación de PPN se debe al aumento o disminución de vegetación en la zona, la que está determinada por el efecto de los incendios forestales, el Cambio Climático y el uso de suelo (considerando su intensidad y transformación).

En este contexto, la superficie afectada por incendios forestales en los períodos 2000-2007 y 2007-2014 fue de un 2% y 3%, respectivamente, con respecto a la superficie total de la región (CONAF, 2018), cifras casi insignificantes. Por otro lado, el Cambio Climático se ha encargado de elevar la temperatura de la superficie terrestre y de disminuir la disponibilidad de agua en gran parte de Chile, afectando principalmente a la agricultura (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2017). Según plantea Song et al. (2018), las variaciones de temperatura y de precipitación son elementos que han sido precursores de la dinámica y del cambio en los usos de suelo. Por lo tanto, se podría decir que el factor que más influye en las variaciones de PPN aérea en el área de estudio es el cambio de uso de suelo.

La PPN depende del tipo y cantidad de vegetación existente en el lugar, lo que a su vez depende del tipo de uso de suelo, el cual define la eficiencia con la cual se utiliza el recurso suelo.

4.6. Correlación de la PPN en términos de MJ_{ex}/m^2 año por cada uso de suelo

La figura 14 muestra los valores medios de PPN aérea expresados en MJ_{ex}/m^2 año de cada uso de suelo para los años 2000, 2007 y 2014. Mínimas, máximas, media y desviación estándar de PPN por uso de suelo detallados en anexo 10. Los mayores valores son obtenidos por las plantaciones forestales (89-92 MJ_{ex}/m^2 año aprox.), seguido del BNR (75-76 MJ_{ex}/m^2 año) mientras que los matorrales, terrenos agrícolas y BN presentan valores similares oscilando entre 60-67 MJ_{ex}/m^2 año. Las praderas se encuentran en el último lugar, con valores decrecientes temporalmente desde 61 a 49 MJ_{ex}/m^2 año, reflejando la disminución en la calidad de su suelo.

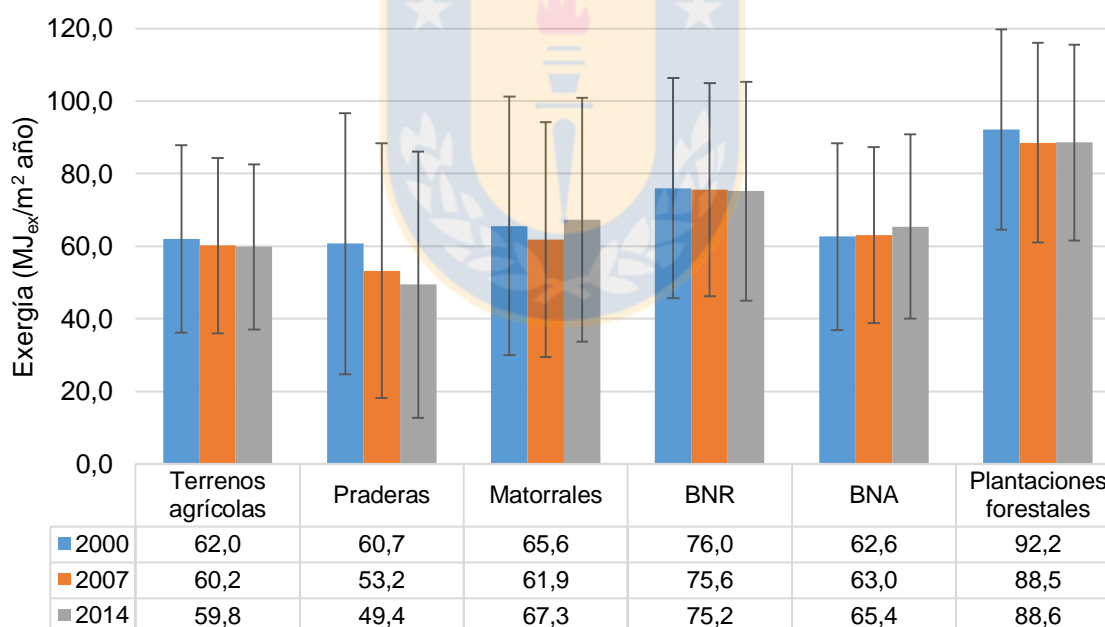


Figura 14. PPN en términos de exergía (MJ_{ex}/m^2 año) por uso de suelo de 2000, 2007 y 2014.

La alta productividad de las plantaciones forestales está estrechamente relacionada con su intenso uso, asociado principalmente a la importancia económica del sector

forestal en las regiones estudiadas (Biobío y Ñuble). A pesar de ello, presentan un comportamiento ligeramente decreciente, disminuyendo de 92,2 a 88,5 MJ_{ex}/m² año).

Dicho comportamiento también se ve reflejado en los terrenos agrícolas (de 62 a 59,8 MJ_{ex}/m² año) y en el BNR (de 76 a 75,2 MJ_{ex}/m² año) en el periodo 2000-2014. Básicamente, el 3,5% de reducción de PPN por parte de los terrenos agrícolas se debió a la degradación en el suelo por malas prácticas de manejo agrícola (Hernández et al., 2016). Por otra parte, los rendimientos agrícolas también pudieran ser un factor relevante en la reducción de PPN. Sin embargo, en nuestro caso de estudio se ha evidenciado un alza en los rendimientos (quintales métricos por hectárea) para los cultivos existentes (trigo, avena, arroz, papa, remolacha) durante el periodo 2000-2014 (ODEPA, 2018).

A diferencia del BNR, el BNA contiene menor productividad, produciendo cerca de un 84% de la PPN aérea del BNR. Las variaciones registradas se deben principalmente al tiempo de residencia de la madera (biomasa/PPN de la madera), edad estructural de cada especie, temperatura, nutrientes del suelo, disponibilidad de agua en el suelo (Erb et al., 2018; Doughty et al., 2018). En efecto, estudios han encontrado menores cantidades de energía transferible en bosques adultos que en sistema de manejo del suelo (da Costa et al., 2014; Doughty et al., 2018).

Las mayores variaciones de PPN aérea las obtienen las praderas. En este caso, la PPN muestra una tendencia decreciente con respecto al 2000, reduciéndose entre un 12% y 19% para el 2007 y el 2014, respectivamente. Este comportamiento está relacionado con el uso intensivo en la ganadería, lo que implica considerables pérdidas de la calidad del suelo y por consiguiente pérdidas en la productividad (Erb et al., 2018). Estos resultados corroboran la influencia significativa de las actividades antrópicas sobre la intensidad del uso del suelo en términos de exergía.

No existen estudios similares que expresen la PPN aérea en términos de exergía, por lo que resulta difícil comparar los resultados del presente estudio. El estudio de

Alvarenga et al. (2013b) determinó la PPN potencial (en ausencia del hombre), pero sus resultados no son comparables primeramente por las distintas PPN analizadas (aérea y potencial), además, por las diferencias metodológicas existentes asociadas a los modelos de estimación de reservas de carbono. En el caso de Alvarenga et al. (2013b), se utilizó un modelo de vegetación dinámica que suele ser más preciso que los modelos basados en la teledetección, usado en el presente estudio. Sin embargo, comparando los resultados de PPN potencial (20 – 30 MJ_{ex}/m² año, ver anexo 9) con la PPN aérea (49 – 92 MJ_{ex}/m² año, ver fig. 14), se puede concluir que las intervenciones humanas pudieran generar mayores cantidades de biomasa que el sistema natural, asociado principalmente a fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, riego, etc. En efecto, estudios realizados por Haberl et al. (2007) demuestran que la influencia antrópica puede generar mayores cantidades de biomasa que la potencial.

4.7. Efecto del cambio de uso de suelo sobre la PPN aérea (MJ_{ex}/m² año)

Utilizando la matriz de transición de uso de suelo y la PPN aérea, se estudió el efecto de los cambios de uso de suelo sobre la PPN para el periodo 2000-2014. Las figuras 15 a la 17 detallan para cada uso de suelo el aumento o disminución (en términos de porcentaje) de la PPN aérea debido al cambio hacia otros usos. Información detallada por períodos (PJ_{ex}/año) en anexo 11 e información sobre los totales anuales (PJ_{ex}/año) y sus variaciones en anexo 12.

Los porcentajes de pérdidas de PPN se muestran con líneas discontinuas de color rojo y los de ganancias con líneas continuas de color verde. El recuadro marcado en negro se refiere al uso de suelo analizado y el círculo anexo al mismo identifica el porcentaje perdido o ganado de PPN aérea de la superficie que no sufrió cambio. Las líneas y círculos en color gris indican porcentajes iguales o inferiores a 1%.

Bosques nativos

La transición del bosque nativo adulto y renoval hacia otros usos se ilustra en la figura 15. El bosque renoval presenta mayores pérdidas (al cambiar de uso) que el bosque adulto debido a su mayor productividad.

Las pérdidas de PPN aérea desde el bosque renoval están dominadas por el cambio hacia praderas (-35%), terrenos agrícolas (-21%), bosque nativo adulto (-14%) y matorrales (-12%). Por otro lado, las ganancias se asocian únicamente a la sustitución por plantaciones forestales (17%), las cuales son manejadas intensivamente para fines industriales, generando en cortos periodos de tiempo altos niveles de productividad. Por otro lado, la superficie que se mantuvo como tal no presentó cambios significativos.

En cambio, la transición desde el bosque adulto hacia otros usos presentó mayor cantidad de ganancias, lideradas por las plantaciones forestales aumentando un 41% su productividad, seguido de un 20% para BNR y un 7% para matorrales. Las pérdidas registradas fueron principalmente por el cambio hacia praderas (-21%), dejando al cambio hacia terrenos agrícolas con un valor casi insignificante (-4%, 0,02 PJ_{ex}/año).

Praderas y matorrales

Para el período 2000-2014, el cambio desde praderas hacia otros usos fue positivo, exceptuando hacia terrenos agrícolas (variación despreciable), como se ve en la figura 16. Como es de esperar, las mayores ganancias surgen de la transición hacia plantaciones, representado un incremento del 46%. También se presentan ganancias para el cambio hacia bosque nativo renoval (24%) y matorrales (11%), mientras que en menor porcentaje se ubica el bosque nativo adulto (8%).

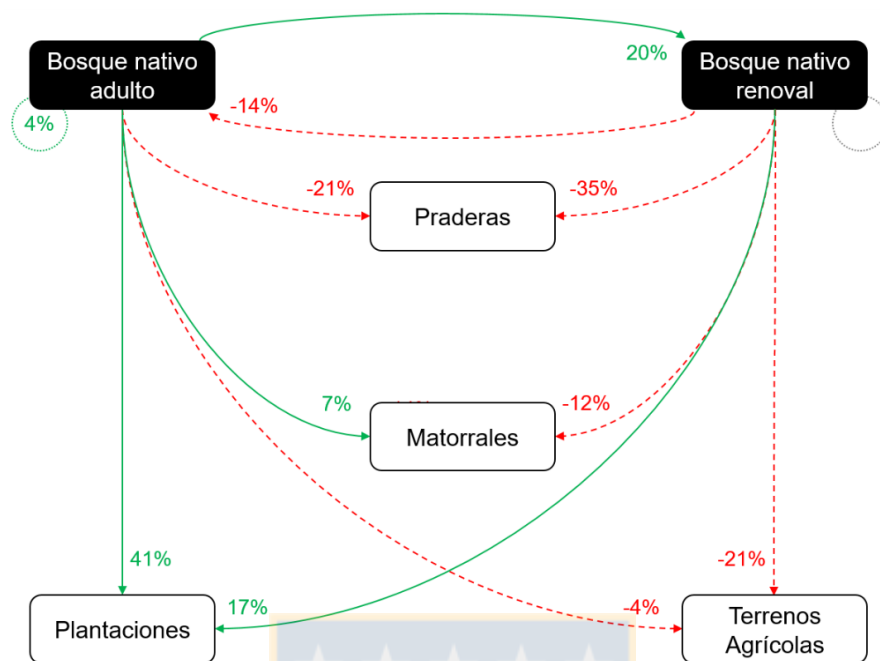


Figura 15. Variación de la PPN aérea producto del cambio de uso de suelo (% con respecto a la cantidad existente en 2000). Transición desde bosque nativo adulto y bosque nativo renoval hacia otros usos de suelo en el período 2000-2014.

La PPN de la superficie de praderas que se mantuvo como tal bajó un -19%, reflejando la disminución en la calidad de su suelo reportada anteriormente. Un deficiente manejo de las praderas son las principales causas de su baja eficiencia y productividad. En efecto, el 90% de las praderas no presentaban un plan sistemático de mejoramiento (DEPROREN, 2004) hasta el 2010, cuando se estableció el Programa de Recuperación de Suelos con el objetivo de recuperar el potencial productivo de los suelos agropecuarios degradados y mantener los niveles de mejoramiento alcanzado (Ley N°20.412/2010).

Con respecto a los matorrales, su PPN disminuyó de 283,3 a 233,7 $PJ_{ex}/año$ desde el 2000 al 2014 debido a la pérdida de superficie registrada. Sin embargo, la superficie que se mantuvo como tal aumentó en un 3% su productividad (ver fig. 16). Dicho aumento está asociado básicamente a la existencia de matorrales altos, que por sus características no clasifican como bosques (medir menos de 5 m, sin

tronco definido), pero implican valores importantes de PPN. Las ganancias más significativas se asocian a la transición hacia plantaciones, aumentando en un 35% (31,20 PJ_{ex}/año), seguido del bosque nativo renoval (15%), evidenciando que la transición hacia especies de mayor vegetación superficial pudiera implicar ganancias en su productividad. Por otra parte, las pérdidas de PPN también son significativas para este uso de suelo, predominando el cambio a praderas (-25%). El cambio hacia bosque nativo adulto fue despreciable.

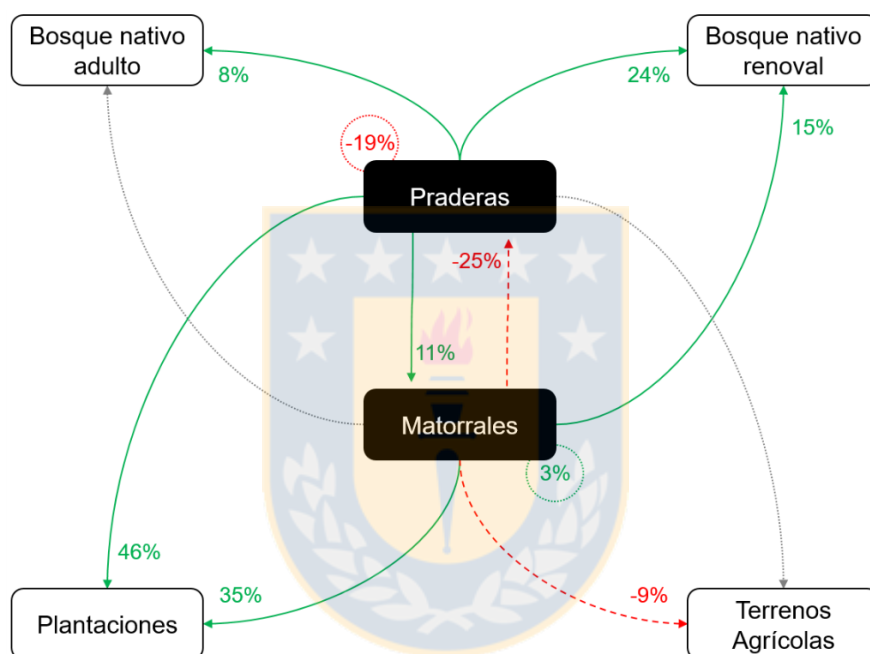


Figura 16. Variación de la PPN aérea producto del cambio de uso de suelo (% con respecto a la cantidad existente en 2000). Transición desde praderas y matorrales hacia otros usos de suelo en el período 2000-2014.

Terrenos agrícolas y plantaciones forestales

En el período evaluado (2000-2014), la superficie que se mantuvo como terreno agrícola registró una pérdida de PPN de -11,96 PJ_{ex}/año, representando una reducción del -3% con respecto al año 2000, como se muestra en la figura 17. Las transiciones hacia otros usos de suelo fueron beneficiosas, principalmente hacia

plantaciones, obteniendo una ganancia 43%, seguido del bosque nativo renoval (21%), matorrales (9%) y bosque nativo adulto (6%). El único cambio que presentó pérdidas fue la transición hacia praderas, disminuyendo su PPN en 20%.

Mientras que la mayoría de los cambios desde terrenos agrícolas hacia otros usos afectan de forma positiva a la PPN, los cambios desde las plantaciones forestales solo registraron pérdidas, incluso en la superficie que se mantuvo como tal, por ser el uso con mayor manejo (ver fig. 17) Las mayores pérdidas de PPN se registraron al cambiar hacia praderas, con un -46% con respecto al potencial exergético del 2000 (-5,10 $PJ_{ex}/año$). Porcentajes muy cercanos registra la transición hacia terrenos agrícolas (-35%), bosque nativo adulto (-29%) y matorrales (-27%), disminuyendo -16,73; -2,14 y -15,72 $PJ_{ex}/año$ respectivamente, dejando el cambio hacia bosque nativo renoval como la transición con menos pérdidas, disminuyendo -18% (-20,29 $PJ_{ex}/año$). La superficie que no sufrió cambios disminuyó un -4%, perdiendo 25,61 $PJ_{ex}/año$ y evidenciando una disminución en la calidad de su suelo, a pesar de los incentivos establecidos.

Estos resultados demuestran que la transición de la cobertura del suelo hacia otros usos no necesariamente implica pérdidas de PPN. Las principales razones de las ganancias significativas obtenidas con la transición hacia plantaciones se deben a las grandes superficies sustituidas (26%) asociadas principalmente al marco normativo para el desarrollo forestal en el país. Por otra parte, la estructura de la vegetación también tiene una influencia significativa en la PPN, puesto que mientras mayores sean las reservas de carbonos registradas en la biomasa, mayor será su productividad, lo que al mismo tiempo implica mayores exergías, es decir, mayor eficiencia del uso del suelo. La especie utilizada también juega un rol importante en la PPN, puesto que al ser especies de rápido crecimiento (pino y eucalipto) su productividad es mayor que en especies nativas.

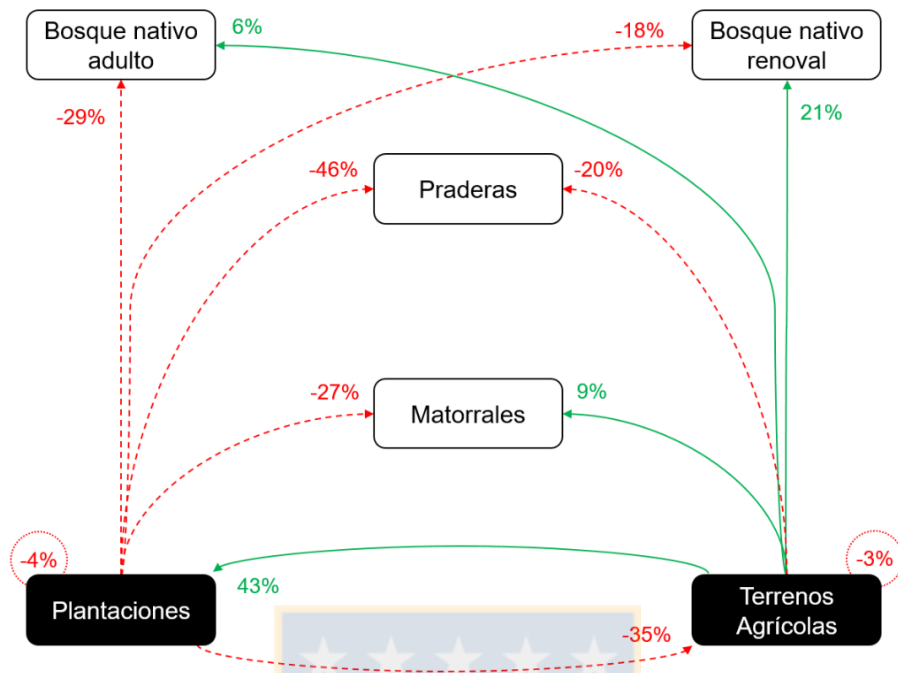


Figura 17. Variación de la PPN aérea producto del cambio de uso de suelo (% con respecto a la cantidad existente en 2000). Transición desde terrenos agrícolas y plantaciones forestales hacia otros usos de suelo en el período 2000-2014.

Cabe señalar que, si bien la productividad de la superficie que cambia hacia plantaciones forestales aumenta, el incremento de monocultivos afecta negativamente al medio ambiente, como se señaló anteriormente, provocando pérdida de biodiversidad, fragmentación del bosque nativo y disminución de la energía disponible en el sistema, entre otros (Hofstede, 2000; Echeverría et al., 2006; Cordero, 2011).

La alta productividad de las plantaciones forestales se debe a la fuerte intervención antrópica ejercida sobre ellas por medio de los sistemas de manejo contemplados (herbicidas, pesticidas, fertilizantes, riego, etc.). La figura 18 explica de forma clara esta situación, demostrando que sistemas manipulados por el hombre son capaces de generar mayores cantidades de exergía (Alvarenga et al., 2013a), en este caso, de biomasa.

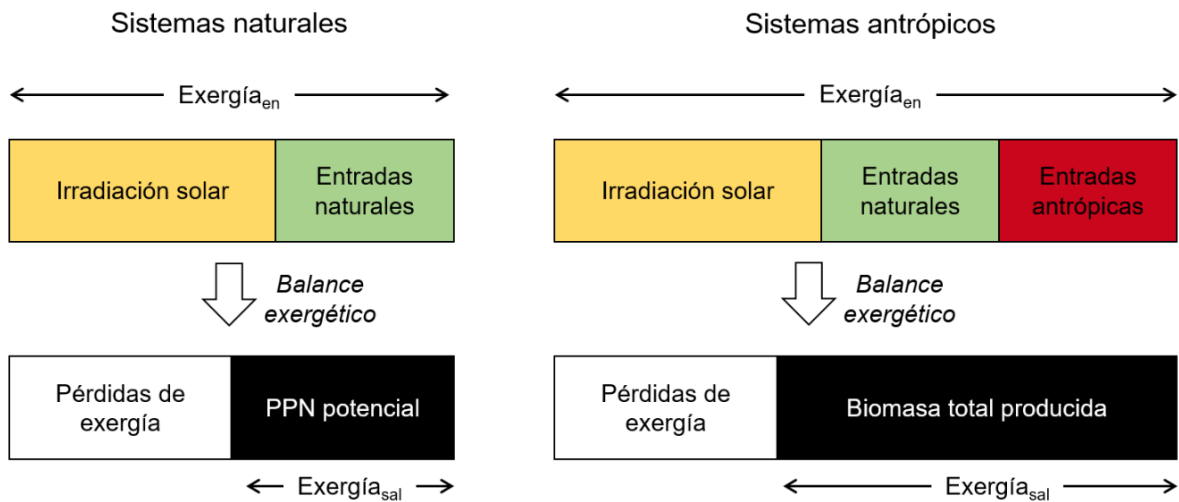


Figura 18. Representación del balance exergético de la producción de biomasa de sistemas naturales (izquierda) y antropicos (derecha).

Fuente: Alvarenga et al. 2013a

En los sistemas naturales (como los bosques nativos y matorrales), la irradiación solar y las entradas naturales (precipitaciones, viento, CO_2 , etc.) son los insumos de la PPN potencial (en ausencia del ser humano), donde dependiendo del balance exergético y su eficiencia, se obtendrán ciertas pérdidas de exergía, ocasionando que la exergía que sale del sistema ($Exergía_{sal}$) sea menor que la que entra ($Exergía_{en}$). Por otro lado, en los sistemas antropicos el ser humano incorpora diferentes entradas (fertilizantes, combustibles fósiles, agua, etc.), sumándose a los insumos naturales, provocando una mayor obtención de biomasa total producida, es decir, un mayor contenido exergético a pesar de que las pérdidas sean las mismas en ambos sistemas (Alvarenga et al., 2013a). Es por esto que, para la toma de decisiones, se recomienda realizar un balance exergético considerando todos los recursos involucrados en el sistema para así determinar las verdaderas eficiencias.

5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se analizaron los cambios de uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble en 1994, 2007 y 2015 y su relación con la productividad primaria neta aérea de los años 2000, 2007 y 2014, en términos de kg C y MJ_{ex}.

Entre 1994 y 2015, el mayor cambio de uso de suelo fue el notorio aumento de las plantaciones forestales, atribuyendo como mayor responsable al DL 701/1974 (incentivo forestal), provocando distintos tipos de impactos negativos en el ambiente reportados por estudios anteriores (pérdida de biodiversidad, fragmentación del bosque nativo y disminución de la energía disponible en el sistema, entre otros). El 32% de la superficie que sufrió cambios se transformó a plantaciones, siendo más pronunciado entre 1994-2007 (34%) que en 2007-2015 (22%).

Las mayores productividades se relacionan con la ubicación espacial de las plantaciones forestales y se deben a las características de las especies cultivadas (rápido crecimiento), al manejo intensivo (agroquímicos, por ejemplo) y a la vasta superficie ocupada. En promedio, entre 2000 y 2014 se produjeron 58 Tg C/año, donde las plantaciones aportaban el 42% del total de PPN.

En términos de MJ_{ex}/m² año, el análisis temporal por uso de suelo no arrojó resultados significativos. Sin embargo, comparando entre usos, nuevamente se destaca la alta productividad de las plantaciones forestales (89,76 MJ_{ex}/m² año en promedio) relacionada al intenso manejo recibido (uso de herbicida, pesticidas, riego, tipo de especies plantadas, etc.) lo que aumentaría notablemente la cantidad de biomasa producida. En menores cantidades se encuentra el bosque nativo renoval (75,61 MJ_{ex}/m² año) matorrales (64,91 MJ_{ex}/m² año), bosque nativo adulto (63,70 MJ_{ex}/m² año) y terrenos agrícolas (60,67 MJ_{ex}/m² año), dejando a las praderas en último lugar (54,46 MJ_{ex}/m² año).

El cambio de uso de suelo ha provocado tanto aumento como disminución de productividad aérea y, por tanto, de la eficiencia en el uso del suelo entre 2000 y 2014, obteniendo una ganancia de 5,82 Tg C/año y una pérdida de -5,12 Tg C/año.

El efecto más notorio fue el cambio hacia plantaciones forestales, donde los porcentajes de productividad aumentaban considerablemente debido al manejo realizado. Por el contrario, el cambio hacia praderas provocaba las mayores pérdidas de productividad, reflejando la baja calidad del suelo de dicho uso.

Utilizar la PPN como indicador permite entender la dinámica de la intensidad del uso de suelo. Constituye el punto de partida para establecer indicadores que contabilizan el impacto sobre el medio ambiente, tales como la apropiación humana sobre la PPN (AHPPN) y permite evaluar la sustentabilidad del uso de los recursos de los sistemas antrópicos. Finalmente, para determinar la eficiencia real de los sistemas a estudiar se recomienda realizar un balance general considerando todos los recursos utilizados, puesto que la intervención humana puede jugar un rol importante a la hora de producir biomasa.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguayo, M., y Pauchard, a. (2009). “Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje”. *Revista chilena de ...*, 361–374.

N, R. A. F., Dewulf, J., y Van Langenhove, H. (2013a). “A new natural resource balance indicator for terrestrial biomass production systems”. *Ecological Indicators*, Elsevier Ltd, 32, 140–146.

Alvarenga, R. A. F., Dewulf, J., Van Langenhove, H., y Huijbregts, M. A. J. (2013b). “Exergy-based accounting for land as a natural resource in life cycle assessment”. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 939–947.

Alvarenga, R. A. F., Erb, K.-H., Haberl, H., Soares, S. R., Van Zelm, R., y Dewulf, J. (2015). “Global land use impacts on biomass production — a spatial-differentiated resource-related life cycle impact assessment method”. *Int J Life Cycle Assess*, 20, 440–450.

Ardö, J. (2015). “Comparison between remote sensing and a dynamic vegetation model for estimating terrestrial primary production of Africa”. *Carbon Balance and Management*, 10(1).

Baccini, A., Walker, W., Carvalho, L., Farina, M., Sulla-Menashe, D., y Houghton, R. A. (2017). “Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss”. *Science*, 258, 230–234.

BCN. Región de Ñuble. Recuperado el 2 de octubre 2018, de <https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial/region-de-nuble>.

Biblioteca Nacional de Chile. Reforma agraria. Recuperado el 6 de febrero 2019, de <http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-3536.html#documentos>.

Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A. J., y Frischknecht, R. (2007). “Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to theecoinvent Database *”. 12(3), 181–190.

Campitelli, Paola, Aoki, Antonio, Gudelj, Olga, Rubenacker, Andrea, & Sereno, Roberto. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 28(2), 223-231. Recuperado el 13 de diciembre de 2018, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672010000200010&lng=es&tlng=es.

CChC. Estudio del Ministerio de Energía revela situación actual del consumo de leña a nivel nacional. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.construccion-sustentable.cl/?p=5340>.

CMPC. Ciclo forestal. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de http://www.cmpcmaderas.cl/?page_id=44.

CONAF. DL 701 y sus reglamentos. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/plantaciones-forestales/dl-701-y-sus-reglamentos/>.

CONAF. Estadísticas históricas. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>.

Cordero Rivera, A. (2011). Cuando Los Árboles No Dejan Ver El Bosque: Efectos De Los Monocultivos Forestales En La Conservación De La Biodiversidad. *Acta Biológica Colombiana*, 16 (2), 247-268.

CORMA. Sede Biobío. Recuperado el 6 de febrero 2019 de <https://www.corma.cl/quienes-somos/sedes-regionales/sede-biobio/>.

da Costa, A. C. L., Metcalfe, D. B., Doughty, C. E., de Oliveira, A. A. R., Neto, G. F. C., da Costa, M. C., Silva Junior, J. de A., Aragão, L. E. O. C., Almeida, S., Galbraith, D. R., Rowland, L. M., Meir, P., y Malhi, Y. (2014). "Ecosystem respiration and net primary productivity after 8 – 10 years of experimental through-fall reduction in an eastern Amazon forest". *Plant Ecology & Diversity*, 7(1–2), 7–24.

Decreto Ley 701/1974. Regimen Legal de los terrenos forestales o preferentemente aptos para la forestación. Ministerio de Agricultura, Chile.

Departamento de Estudios Direcon-ProChile, en base a cifras del Servicio Nacional de Aduanas. Exportaciones chilenas. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de http://chileindata.cl/chile_map_single.html.

Dewulf, J., Bösch, M. E., de Meester, B., van der Vorst, G., van Langenhove, H., Hellweg, S., y Huijbregts, M. A. J. (2007). "Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting". *Environmental Science & Technology*, 41, 8477–8483.

Dewulf, J., Van Langenhove, H., Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B. R., Grubb, G. F., Paulus, D. M., y Sciubba, E. (2008). "Critical review exergy: Its potential and limitations in environmental science and technology". *Environmental Science & Technology*, 42(7), 2221–2232.

Doughty, C. E., Goldsmith, G. R., Raab, N., Girardin, C. A. J., Farfan-Amezquita, F., Huaraca-Huasco, W., Silva-Espejo, J. E., Araujo-Murakami, A., da Costa, A. C. L., Rocha, W., Galbraith, D., Meir, P., Metcalfe, D. B., y Malhi, Y. (2018). "What controls variation in carbon use efficiency among Amazonian tropical forests?" *Biotropica*, 50(1), 16–25.

Echeverria, C., Coomes, D., Salas, J., Lara, A., y Newton, A. (2006). "Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests". 0.

Educarchile. VIII región. Geografía y clima. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://ww2.educarchile.cl/Portal.Base/Web/verContenido.aspx?ID=130236>.

Erb, K. H., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A. L. S., Carvalhais, N., Fetzel, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., y Luysaert, S. (2018). "Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass". *Nature*, Nature Publishing Group, 553(7686), 73–76.

Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Gingrich, S., Bondeau, A., Fischer-Kowalski, M., y Haberl, H. (2009). "Analyzing the global human appropriation of net primary production - processes, trajectories, implications. An introduction". *Ecological Economics*, Elsevier B.V., 69(2), 250–259.

FAO. Funciones del suelo. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.fao.org/3/a-ax374s.pdf>

FAO. Suelos sanos para una vida sana. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.fao.org/soils-2015/faq/es/>.

FAO. Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>.

Gitelson, A. A., y Gamon, J. A. (2015). "The need for a common basis for defining light-use efficiency: Implications for productivity estimation". *Remote Sensing of Environment*, 156, 196–201.

Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzer, C., Gingrich, S., Lucht, W., y Fischer-Kowalski, M. (2007). "Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(31), 12942–12947.

Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., y Lambin, E. F. (2016). "A plantation-dominated forest transition in Chile". 75.

Hernández, Á., Arellano, E. C., Morales-moraga, D., y Miranda, M. D. (2016). "Catena Understanding the effect of three decades of land use change on soil quality and biomass productivity in a Mediterranean landscape in Chile". *Catena*, Elsevier B.V., 140, 195–204.

INIA. Cambio climático en el centro sur de Chile. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/2017/05/Cambio-Clim%C3%A1tico-en-el-Centro-Sur-de-Chile.-Impactos-recientes-y-pron%C3%B3sticos.pdf>

IPCC. Calentamiento global. Recuperado el 3 de enero de 2019, de <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Leiva Sajuria, C. (2014). "La Agricultura y la Ciencia". *IDESIA*, 32, 3–5.

Ley 20283/2008. Sobre Recuperación Del Bosque Nativo Y Fomento Forestal. Ministerio de Agricultura, Chile.

Liao, W., Heijungs, R., y Huppel, G. (2012). "Thermodynamic resource indicators in LCA: a case study on the titania produced in Panzhihua city, southwest China". 951–961.

López, V. H., y Plata, W. (2009). "Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000". *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 68, 85–101.

Manuschevich, D., y Beier, C. M. (2016). "Land Use Policy Simulating land use changes under alternative policy scenarios for conservation of native forests in south-central Chile". Elsevier Ltd, 51, 350–362.

Mather, A. S., y Mather, S. (2008). "Forest transition theory and the reforestation of Scotland Forest Transition Theory and the Reforestation of Scotland". 2541.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being*.

Nahuelhual, L., Carmona, A., Lara, A., Echeverría, C., y González, M. E. (2012). "Landscape and Urban Planning Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile". *Landscape and Urban Planning*, Elsevier B.V., 107(1), 12–20.

NASA. MOD17A3 | LP DAAC: NASA Land Data Products and Services. Recuperado el 20 de agosto de 2018, de https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod17a3.

ODEPA. Estadísticas productivas. Recuperado el 6 de febrero 2019 de <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>.

ODEPA. Programa de suelos degradados. Recuperado el 6 de febrero 2019, de <https://www.odepa.gob.cl/temas-transversales/agricultura-sustentable/programa-de-suelos-degradados-sirsd>.

Páramos, L., y Agua, D. (2000). “II Conferencia Electrónica sobre Usos Sostenibles y Conservación del Ecosistema Páramo en los Andes”:

Pellikka, P. K. E., Heikinheimo, V., Hietanen, J., Schäfer, E., Siljander, M., y Heiskanen, J. (2018). “Impact of land cover change on aboveground carbon stocks in Afromontane landscape in Kenya”. *Applied Geography*, Elsevier Ltd, 94(March), 178–189.

Pérez, T., Mattar, C., y Fuster, R. (2018). “Decrease in Snow Cover over the Aysén River Catchment in Patagonia, Chile”. *water*, 10.

Rehren, Alfredo, Orellana, Arturo, Arenas, Federico, & Hidalgo, Rodrigo. (2018). La regionalización en un contexto de urbanización regional: desde los desafíos a las propuestas de nuevos criterios de zonificación para el caso chileno. *Revista de geografía Norte Grande*, (69), 191-209. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022018000100191>

Rivera, A., y Bown, F. (2013). “Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37° - 46°S), Chilean Andes”. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 345–356.

Saavedra, P., y Sepúlveda-Varas, A. (2016). “Systematic transitions in land use and land cover in a pre-Andean sub-watershed with high human intervention in the Araucania Region, Chile”. *Ciencia e Investigación Agraria*, 43(Environmental and ecology), 396–407.

Song, X., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., y Townshend, J. R. (2018). “Global land change from 1982 to 2016”. *Nature*,

Springer US.

Taelman, S. E., Schaubroeck, T., De Meester, S., Boone, L., y Dewulf, J. (2016). “Accounting for land use in life cycle assessment: The value of NPP as a proxy indicator to assess land use impacts on ecosystems”. *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V., 550, 143–156.

“When you Cannot See the Forest for the Trees : Effect of Forest Monocultures on Biodiversity Conservation”. (2011).

WWF. Erosión del suelo y degradación. Recuperado el 3 de enero de 2019, de <https://www.worldwildlife.org/threats/soil-erosion-and-degradation>

Zhang, Y., Pan, Y., Zhang, X., Wu, J., Yu, C., Li, M., y Wu, J. (2018). “Patterns and dynamics of the human appropriation of net primary production and its components in Tibet”. *Journal of Environmental Management*, Elsevier Ltd, 210, 280–289.



7. ANEXOS

Anexo 1. Usos de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble del año 2015.

Tabla 6. Usos de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble del año 2015.

Uso de Suelo	Superficie (ha)
Bosques	2.170.129,7
Plantaciones forestales	1.255.890,0
Bosque Nativo	845.552,3
Bosque mixto	68.687,4
Terrenos agrícolas	715.001,4
Praderas y matorrales	516.727,5
Áreas desprovistas de vegetación	169.493,3
Cuerpos de agua	55.170,0
Áreas urbanas e industriales	41.494,0
Nieves y glaciares	30.136,9
Humedales	11.151,0
TOTAL	3.709.303,8

Fuente: CONAF, 2017



Anexo 2. Usos de suelo de la región del Biobío y Ñuble (1994, 2007 y 2015) y su reclasificación.

En 1994, 2007 y 2015 la CONAF registró los usos de suelo de la antigua región del Biobío. Sin embargo, dichos usos no han sido constantes en el tiempo. La tabla A2 muestra los usos identificados en cada año y a los que fueron reclasificados para efectos del presente estudio.

Tabla 7. Usos de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble (1994, 2007 y 2015) y su reclasificación.

Clasificación	Uso de suelo - 1994	Uso de suelo - 2007	Uso de suelo - 2015
Áreas sin vegetación	Afloramientos Rocosos Áreas Sobre Limite Vegetación Cajas de Ríos Corridas de Lava y Escoriales Derrumbes Sin Vegetación Otros Terrenos Sin Vegetación Playas y Dunas	Afloramientos Rocosos Áreas Sobre Limite Vegetación Cajas de Ríos Corridas de Lava y Escoriales Derrumbes Sin Vegetación Otros Terrenos Sin Vegetación Playas y Dunas	Afloramientos Rocosos Cajas de Ríos Corridas de Lava y Escoriales Derrumbe sin Vegetación Otros sin Vegetación Playas y Dunas Terreno sobre Limite Altitudinal de la Vegetación
Áreas urbanas e industriales	Ciudades-Pueblos-Zonas.Indus. Minería Industrial	Ciudades-Pueblos-Zonas.Indus. Minería Industrial	Ciudades,Pueblos,Zonas Industriales Minería Industrial
Bosque Nativo Adulto	B.Nat.Adulto-Renoval Abierto B.Nat.Adulto-Renoval Denso B.Nat.Adulto-Renoval Semidenso Bosque Nativo Adulto Abierto Bosque Nativo Adulto Denso Bosque Nativo Adulto Semidenso	Bosque Nativo Adulto Abierto Bosque Nativo Adulto Denso Bosque Nativo Adulto Semidenso	Bosque Nativo*
Bosque Nativo Renoval	B.Nat.Achaparrado Abierto B.Nat.Achaparrado Denso B.Nat.Achaparrado Semidenso Renoval Abierto Renoval Denso Renoval Semidenso	B.Nat.Achaparrado Abierto B.Nat.Achaparrado Denso B.Nat.Achaparrado Semidenso Renoval Renoval Abierto Renoval Denso Renoval Semidenso	
Cuerpos de agua	Lago-Laguna-Embalse-Tranque Ríos	Lago-Laguna-Embalse-Tranque Ríos	Lagos, Lagunas, Embalses,Tranques Ríos
Humedales	Otros Terrenos Húmedos Marismas Herbáceas Vegas	Otros Terrenos Húmedos Marismas Herbáceas Vegas	Vegas Otros Terrenos Húmedos Marismas Herbáceas
Matorral	Matorral Abierto Matorral Arborescen. Semidenso Matorral Arborescente Abierto Matorral Arborescente Denso Matorral Denso Matorral Pradera Abierto Matorral Pradera Denso	Matorral Abierto Matorral Arbores. Muy Abierto Matorral Arborescen. Semidenso Matorral Arborescente Abierto Matorral Arborescente Denso Matorral Denso Matorral Muy Abierto	Matorral Matorral-Pradera Matorral Arborescente Plantación de Arbustos

	Matorral Pradera Semidenso Matorral Semidenso Plantación de Arbustos	Matorral Pradera Abierto Matorral Pradera Denso Matorral Pradera Muy Abierto Matorral Pradera Semidenso Matorral Semidenso Plantación de Arbustos	
Nieves	Nieves	Nieves	Nieves
Plantaciones forestales	Planta.Joven-Recien Cosechada Plantación	Planta.Joven-Recien Cosechada Plantación	Plantación
Praderas	Praderas Anuales Estepa Andina Central Praderas Perennes	Praderas Anuales Estepa Andina Central Praderas Perennes	Praderas
Terrenos agrícolas	Rotación Cultivo-Pradera Terrenos de Uso Agrícola	Rotación Cultivo-Pradera Terrenos de Uso Agrícola	Rotación Cultivo-Pradera Terreno de Uso Agrícola
Se clasificó según la especie dominante, como "Bosque Nativo Renoval" o "Plantación"	B.Nat-Exóticas Asilv.Semidenso B.Nat-Exóticas Asilves.Abierto B.Nat-Exóticas Asilves.Denso B.Nativo-Plantación Abierto B.Nativo-Plantación Semidenso Bosque Nativo-Plantación Denso Bosques Exóticas Asilvestradas	Bosques Exóticas Asilvestradas B.Nat-Exóticas Asilv.Semidenso B.Nat-Exóticas Asilves.Abierto B.Nat-Exóticas Asilves.Denso B.Nat.Adulto-Renoval Abierto B.Nat.Adulto-Renoval Denso B.Nat.Adulto-Renoval Semidenso B.Nativo-Plantacion Abierto B.Nativo-Plantacion Semidenso Bosque Nativo-Plantacion Denso	Bosque Mixto
Se clasificó según lo observado a sus alrededores	Sin Cobertura Aerofotográfica	Sin Cobertura Aerofotográfica	
Total: 11	Total: 52	Total: 56	Total: 25

* Se clasificó en renoval o adulto según la estructura del bosque nativo. Fuente: CONAF.

Anexo 3. Tasa de cambio, ganancia, pérdida y cambio neto por uso de suelo, por períodos.

Tabla 8. Tasa de cambio, ganancia, pérdida y cambio neto de la superficie de cada uso de suelo entre 1994 y 2007.

Uso de suelo	1994 (ha)	%	2007 (ha)	%	Tasa (%)	Ganancia (ha)	Perdida (ha)	Cambio neto (ha)	%
Terrenos agrícolas	983559	26,5%	829418	22,4%	-1,31	171294	325435	-154141	-15,7%
Praderas	166756	4,5%	146306	3,9%	-1,01	84689	105139	-20450	-12,3%
Matorrales	434685	11,7%	353049	9,5%	-1,60	203731	285367	-81636	-18,8%
Bosque nativo renoval	632665	17,1%	661511	17,8%	0,34	283665	254817	28848	4,6%
Bosque nativo adulto	181368	4,9%	157534	4,2%	-1,08	57582	81416	-23834	-13,1%
Humedales	10210	0,3%	11617	0,3%	0,99	6628	5221	1407	13,8%
Áreas sin vegetación	110441	3,0%	133159	3,6%	1,44	63614	40896	22718	20,6%
Plantaciones forestales	989738	26,7%	1235593	33,3%	1,71	476456	230601	245855	24,8%
Cuerpos de agua	49181	1,3%	55091	1,5%	0,87	27565	21655	5910	12,0%
Áreas urbanas e industriales	25489	0,7%	35685	1,0%	2,59	19631	9435	10196	40,0%
Nieves	125210	3,4%	90339	2,4%	-2,51	23285	58158	-34873	-27,9%
Total	3709302	100%	3709302	100%					

Tabla 9. Tasa de cambio, ganancia, pérdida y cambio neto de la superficie de cada uso de suelo entre 2007 y 2015.

Uso de suelo	2007 (ha)	%	2015 (ha)	%	Tasa (%)	Ganancia (ha)	Perdida (ha)	Cambio neto (ha)	%
Terrenos agrícolas	829418	22,4%	714919	19,3%	-1,86	67169	181668	-114499	-13,8%
Praderas	146306	3,9%	170802	4,6%	1,94	87715	63219	24496	16,7%
Matorrales	353049	9,5%	345785	9,3%	-0,26	179805	187069	-7264	-2,1%
Bosque nativo renoval	661511	17,8%	749310	20,2%	1,56	268888	181090	87798	13,3%
Bosque nativo adulto	157534	4,2%	151047	4,1%	-0,53	56356	62843	-6487	-4,1%
Humedales	11617	0,3%	11188	0,3%	-0,47	5087	5516	-429	-3,7%
Áreas sin vegetación	133159	3,6%	169329	4,6%	3,00	93764	57594	36170	27,2%
Plantaciones forestales	1235593	33,3%	1270126	34,2%	0,34	226689	192156	34533	2,8%
Cuerpos de agua	55091	1,5%	55252	1,5%	0,04	11700	11539	161	0,3%
Áreas urbanas e industriales	35685	1,0%	41402	1,1%	1,86	11266	5549	5717	16,0%
Nieves	90339	2,4%	30142	0,8%	-13,72	12055	72251	-60196	-66,6%
Total	3709302	100 %	3709302	100%					

Anexo 4. Matrices de transición del cambio de uso de suelo, por períodos.

Tabla 10. Matriz de transición del cambio de uso de suelo de la región del Biobío y Ñuble, período 1994-2007 (%).

		Año 1994										
		Terrenos agrícolas	Praderas	Matorrales	Bosque nativo renoval	Bosque nativo adulto	Humedales	Áreas sin vegetación	P. Forestales	Cuerpos de agua	Áreas urbanas e industriales	Nieves
Año 2007	Terrenos agrícolas	67%	9%	12%	4%	0%	9%	2%	6%	10%	15%	0%
	Praderas	1%	37%	4%	3%	6%	7%	5%	1%	4%	1%	9%
	Matorrales	5%	10%	34%	9%	11%	8%	7%	4%	7%	4%	7%
	Bosque nativo renoval	5%	11%	13%	60%	20%	2%	11%	10%	4%	2%	10%
	Bosque nativo adulto	0%	5%	3%	3%	55%	1%	1%	1%	1%	0%	2%
	Humedales	0%	0%	0%	0%	0%	49%	0%	0%	1%	2%	0%
	Áreas sin vegetación	0%	3%	2%	3%	2%	4%	63%	0%	3%	1%	19%
	P. Forestales	20%	22%	28%	15%	4%	7%	4%	77%	11%	10%	0%
	Cuerpos de agua	1%	1%	1%	1%	0%	4%	2%	1%	56%	3%	0%
	Áreas urbanas e industriales	1%	1%	0%	0%	0%	6%	0%	1%	2%	63%	0%
	Nieves	0%	2%	1%	2%	1%	2%	5%	0%	0%	0%	54%
Total 1994	100% (983559 ha)	100% (166756 ha)	100% (434685 ha)	100% (632663 ha)	100% (181368 ha)	100% (10210 ha)	100% (110441 ha)	100% (989738 ha)	100% (49181 ha)	100% (25489 ha)	100% (125212 ha)	

Tabla 11. Matriz de transición del cambio de uso de suelo de las región del Biobío y Ñuble, período 2007-2015 (%).

		Año 2007										
		Terrenos agrícolas	Praderas	Matorrales	Bosque nativo renoval	Bosque nativo adulto	Humedales	Áreas sin vegetación	P. Forestales	Cuerpos de agua	Áreas urbanas e industriales	Nieves
Año 2015	Terrenos agrícolas	78%	5%	5%	2%	0%	13%	0%	2%	1%	5%	0%
	Praderas	2%	57%	4%	2%	2%	9%	19%	1%	1%	1%	11%
	Matorrales	4%	8%	47%	7%	7%	6%	7%	5%	3%	3%	5%
	Bosque nativo renoval	3%	9%	22%	73%	29%	2%	9%	7%	3%	1%	11%
	Bosque nativo adulto	0%	2%	2%	6%	60%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
	Humedales	0%	0%	0%	0%	0%	53%	0%	0%	1%	0%	0%
	Áreas sin vegetación	0%	8%	3%	2%	1%	8%	57%	0%	8%	1%	53%
	P. Forestales	12%	9%	15%	8%	1%	4%	1%	84%	3%	4%	0%
	Cuerpos de agua	0%	0%	1%	0%	0%	2%	2%	0%	79%	0%	0%
	Áreas urbanas e industriales	1%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	84%	0%
	Nieves	0%	1%	0%	0%	0%	0%	6%	0%	0%	0%	20%
	Total 2007		100% (829418 ha)	100% (146306 ha)	100% (353049 ha)	100% (661511 ha)	100% (157534 ha)	100% (11617 ha)	100% (133159 ha)	100% (1235593 ha)	100% (55091 ha)	100% (35685 ha)

Anexo 5. PPN aérea (Tg C/año) por uso de suelo, según año estudiado.

Tabla 12. PPN anual (Tg C/año) por uso de suelo de las regiones del Biobío y Ñuble, según años de referencia.

Uso de suelo	2000	2007	2014
Terrenos agrícolas	14,04	11,53	9,86
Praderas	2,24	1,74	1,82
Matorrales	6,67	4,95	5,45
Bosque nativo renoval	11,11	11,64	12,92
Bosque nativo adulto	2,63	2,30	2,35
Plantaciones	21,18	25,39	26,21

Anexo 6. Máxima, mínima, media y desviación estándar de la PPN en términos de Pg C/año, por año estudiado.

Tabla 13. Máxima, mínima, media y desviación estándar (D.E.) de la PPN aérea de las regiones del Biobío y Ñuble por año de estudio (Pg C/año).

Año	Máxima	Mínima	Media	D. E.
2000	0,131	0,000	0,063	0,031
2007	0,125	0,000	0,063	0,030
2014	0,127	0,001	0,063	0,030

Anexo 7. Dinámica de la PPN aérea y su variación durante los años estudiados.

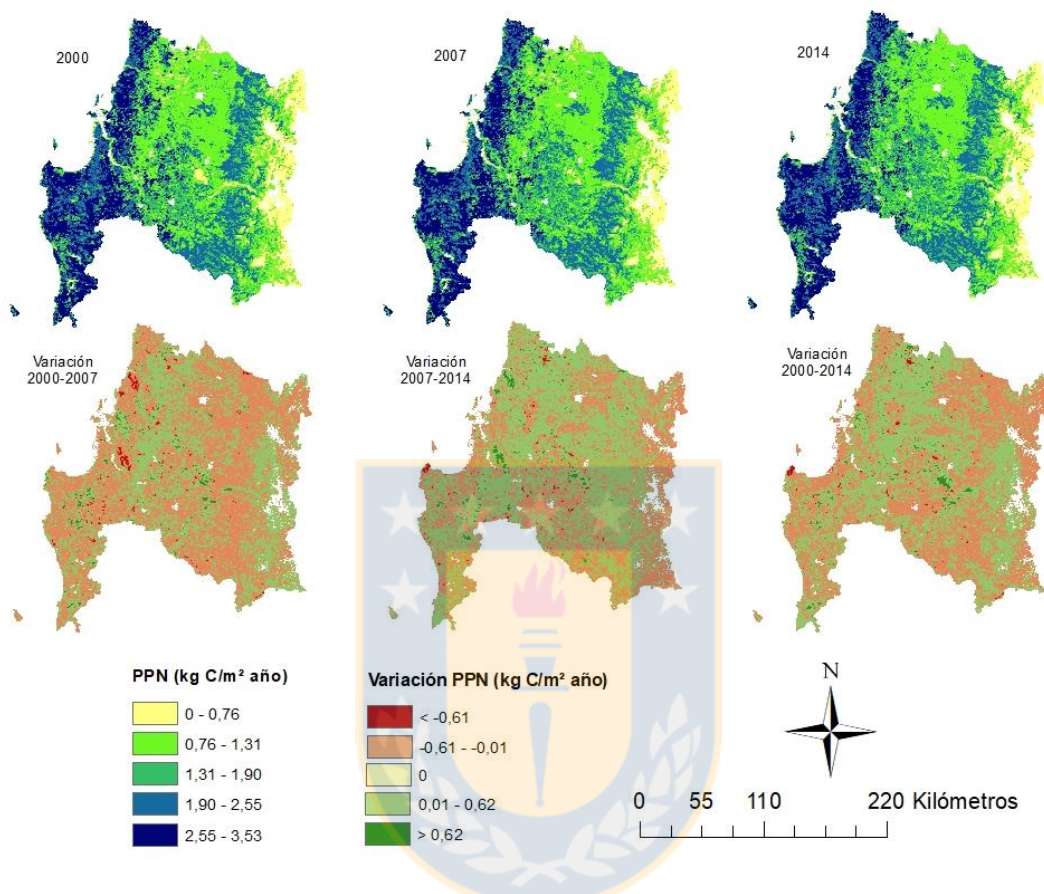


Figura 19. Dinámica de la PPN de las regiones del Biobío y Ñuble (kg C/m² año). Se ilustra la productividad de 2000, 2007 y 2014, así como la variación entre dichos años.

Anexo 8. Porcentajes de pérdida y ganancia de PPN, según períodos estudiados.

Tabla 14. Porcentajes de pérdida y ganancia de PPN en 2000-2007, 2007-2014 y 2000-2014.

Período	Ganancia	Pérdida
2000-2007	45%	55%
2007-2014	59%	40%
2000-2014	53%	47%



Anexo 9. PPN potencial determinada por Alvarenga et al. (2013b)

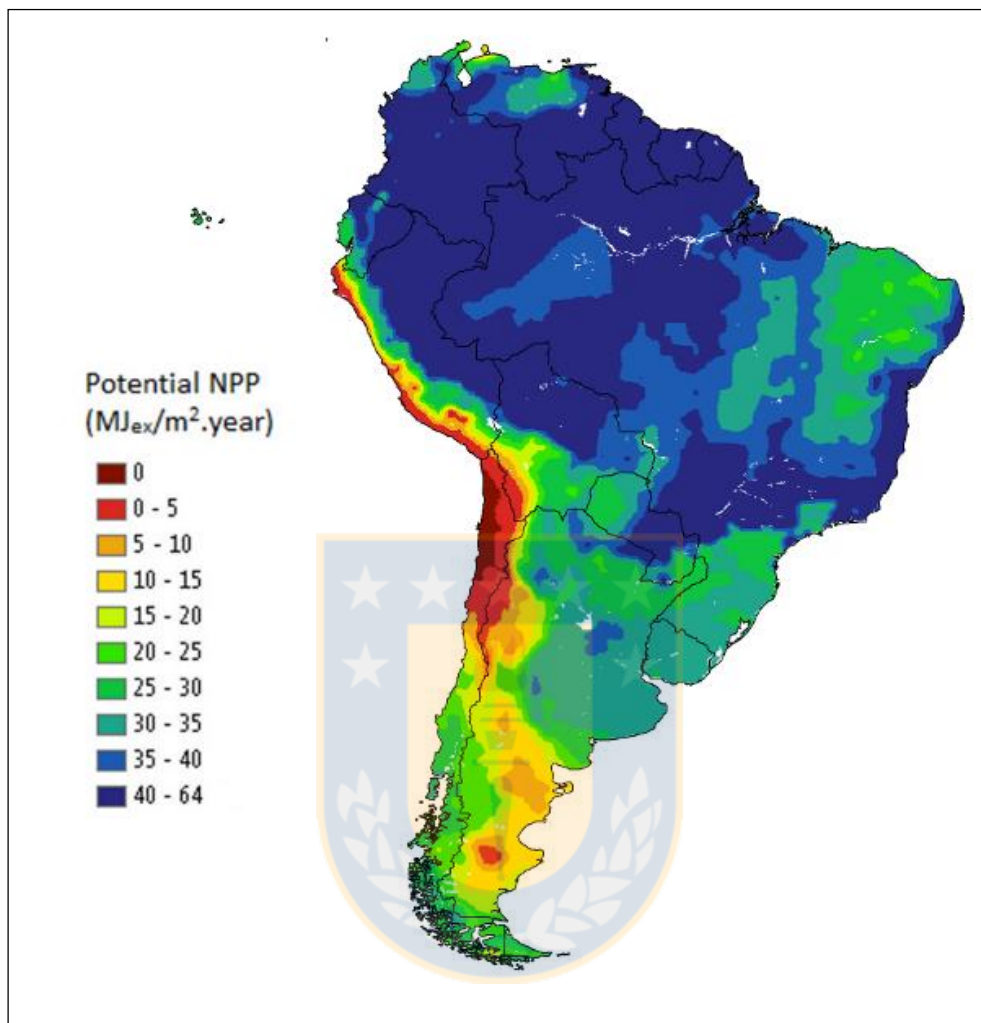


Figura 20. Factores de caracterización en Sudamérica determinados por Alvarenga et al. (2013b).

Anexo 10. Máxima, mínima, media y desviación estándar de PPN aérea (MJ_{ex}/m^2 año) por uso de suelo, según años estudiados.

Tabla 15. Máxima, mínima, media y desviación estándar de PPN en términos MJ_{ex}/m^2 año según uso de suelo de 2000, 2007 y 2014. Solo se indican los usos con presencia de vegetación.

Uso de suelo	2000				2007				2014			
	Mínimo	Máximo	Media	D. E.	Mínimo	Máximo	Media	D. E.	Mínimo	Máximo	Media	D. E.
Plantaciones forestales	6,17	151,57	92,16	27,52	10,69	144,61	88,53	27,52	8,64	147,04	88,59	26,98
Bosque nativo renoval	2,20	149,15	76,02	30,38	6,21	144,02	75,62	29,36	3,10	146,82	75,19	30,18
Matorrales	3,35	151,00	65,61	35,58	3,03	144,99	61,86	32,34	4,74	145,19	67,26	33,59
Bosque nativo adulto	4,61	135,69	62,63	25,77	10,57	133,68	63,05	24,19	10,91	143,24	65,42	25,41
Terrenos agrícolas	9,86	149,95	61,97	25,80	10,70	143,12	60,19	24,12	9,84	146,51	59,85	22,75
Praderas	3,49	151,54	60,69	35,98	3,33	136,95	53,25	35,06	3,32	136,49	49,43	36,67

Anexo 11. Matrices de transición de la PPN en términos de exergía.

Tabla 16. Matriz de transición de la variación del potencial exergético entre 2000 y 2014 ($PJ_{ex}/año$).

Uso de suelo		Año 2000					
		Terrenos agrícolas	Praderas	Matorrales	Bosque nativo renoval	Bosque nativo adulto	Plantaciones forestales
Año 2014	Terrenos agrícolas	-11,96	-0,14	-2,85	-3,55	-0,02	-16,73
	Praderas	-2,05	-5,07	-3,41	-5,45	-1,50	-5,10
	Matorrales	2,91	1,16	1,72	-5,28	0,96	-15,72
	Bosque nativo renoval	8,53	3,60	8,27	-2,98	7,42	-20,29
	Bosque nativo adulto	0,07	0,41	-0,03	-4,01	2,12	-2,14
	Plantaciones forestales	68,06	11,10	31,20	12,76	1,91	-25,61

Tabla 17. Matriz de transición de la variación del potencial exergético entre 2000 y 2007 (P_{J_{ex}}/año).

Uso de suelo		Año 2000					
		Terrenos agrícolas	Praderas	Matorrales	Bosque nativo renoval	Bosque nativo adulto	Plantaciones forestales
Año 2007	Terrenos agrícolas	-11,76	-0,07	-2,94	-4,26	-0,02	-19,86
	Praderas	-0,73	-4,58	-2,23	-3,87	-1,07	-4,12
	Matorrales	-0,05	0,19	-5,59	-8,37	-0,15	-12,74
	Bosque nativo renoval	6,61	2,79	5,74	-1,49	4,72	-15,82
	Bosque nativo adulto	0,01	0,21	-0,35	-2,84	0,42	-1,91
	Plantaciones forestales	53,47	10,04	27,72	12,27	1,92	-27,58

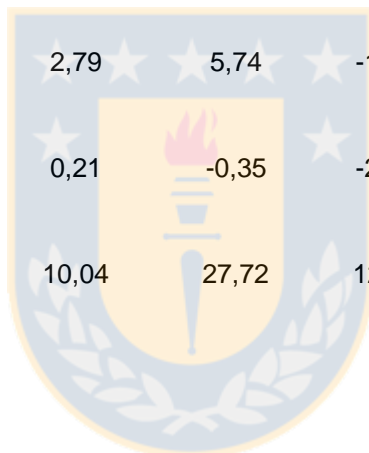


Tabla 18. Matriz de transición de la variación del potencial exergético entre 2007 y 2014 (P_{J_{ex}}/año).

Uso de suelo		Año 2007					
		Terrenos agrícolas	Praderas	Matorrales	Bosque nativo renoval	Bosque nativo adulto	Plantaciones forestales
Año 2014	Terrenos agrícolas	-2,19	0,50	-0,34	-1,59	0,00	-8,00
	Praderas	-1,66	-3,17	-1,72	-2,73	-0,50	-3,08
	Matorrales	2,18	1,64	8,97	-4,07	0,43	-13,03
	Bosque nativo renoval	4,01	2,98	10,48	-2,09	5,46	-10,88
	Bosque nativo adulto	0,02	0,37	0,31	-4,05	2,25	-0,76
	Plantaciones forestales	27,37	4,76	14,44	7,26	0,51	0,60

Anexo 12. PPN aérea total por año ($PJ_{ex}/año$) y su variación (%).

Tabla 19. PPN aérea ($PJ_{ex}/año$) por uso de suelo de los años 2000, 2007 y 2014.

Uso de suelo	2000	2007	2014
Terrenos agrícolas	602,4	494,5	423,1
Praderas	96,0	74,5	78,3
Matorrales	286,3	212,2	233,7
Bosque nativo renoval	476,5	499,5	554,4
Bosque nativo adulto	112,8	98,7	100,7
Plantaciones	908,6	1089,2	1124,5
Total	2482,7	2468,7	2514,7

Tabla 20. Variación de PPN ($PJ_{ex}/año$) en los períodos 2000-2014, 2000-2007 y 2007-2014.

Uso de suelo	2014-2000	%	2007-2000	%	2014-2007	%
Terrenos agrícolas	-181,7	-30%	-110,3	-18%	-71,3	-14%
Praderas	-16,8	-17%	-23,3	-23%	6,5	8%
Matorrales	-52,6	-18%	-66,8	-23%	14,2	6%
Bosque nativo renoval	82,4	17%	19,3	4%	63,1	13%
Bosque nativo adulto	-14,8	-13%	-14,3	-13%	-0,5	-1%
Plantaciones forestales	213,0	23%	181,7	20%	31,3	3%
Total	29,7	1%	-13,7	-1%	43,3	2%