

DEFORESTACIÓN DEL BOSQUE NATIVO, INCENDIOS FORESTALES Y CAUDAL DEL RÍO BIOBÍO EN LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN DE 1987-2021

DEFORESTATION OF NATIVE FOREST, FOREST FIRES AND FLOW OF THE BIO BÍO RIVER IN THE PROVINCE OF CONCEPCIÓN FROM 1987-2021

Belén Cartes* y Constanza Jorquera**

RESUMEN: Debido a los múltiples servicios ecosistémicos que brindan el bosque nativo a una cuenca hidrográfica, su preservación es clave para enfrentar el cambio climático. Este estudio apunta a la revisión de la evolución que ha tenido la cobertura de bosque nativo, la tendencia del caudal mínimo del río Biobío y la magnitud de los incendios en los últimos 34 años. Mediante el procesamiento y corrección de imágenes satelitales de los años 1987, 2001, 2011 y 2021, en casi la totalidad de la provincia de Concepción en la región del Biobío, permitieron definir 8 tipos de coberturas: bosque nativo, suelo descubierto, matorral, humedal, área urbana, área agrícola, agua y plantación exótica. Posteriormente se establece la comparación entre las coberturas a lo largo del periodo evaluado utilizando la herramienta Land Change Modeler. Se obtiene que se han perdido 34,034 ha de bosque nativo, de la cual el 88,87% migro a plantación forestal. Adicionalmente se contrasta esta pérdida de bosque nativo con la disminución de caudal del río Biobío, destacando que el 2017 es el año en que más se pierde bosque nativo a causa de incendios forestales, y este coincide con el caudal promedio más bajo, llegando a observar 221,1 m³/s de caudal en la desembocadura del río Biobío, contrastado con el promedio para el periodo de tiempo estudiado igual a 939,1 m³/s. Esta relación cobra importancia debido a al rol de la cobertura de bosque nativo y al agua disponible en una cuenca. En paralelo se observa un aumento en la superficie afectada por incendio, que favorece la propagación de plantaciones exóticas sobre bosque nativo. Destacando que los valores más bajos de caudal coinciden con el periodo de mayor superficie afectada por incendios Equivalente a 2.706,9 ha ocurrido el 2017, de acuerdo con el catastro de incendios de CONAF. Si bien falta rigurosidad en los análisis estadísticos que se realizaron, es innegable que la alta migración de bosque nativo a plantación forestal juega un papel relevante en los mega incendios.

Palabras clave: bosque nativo, cobertura, Land Change Modeler.

Recibido 27 de septiembre 2021/Aceptado 15 de marzo 2022

*Departamento de Geografía, Magíster en Análisis Geográfico. Universidad de Concepción. Correo electrónico: bcartes@udec.cl. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3934-4612>

**Departamento de Geografía, Magíster en Análisis Geográfico. Universidad de Concepción. Correo electrónico: cojorquera@udec.cl. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2758-6104>

ABSTRACT: The importance of preserving the native forest has become relevant in the current context of drought and climate change, along with the relationship between native species and base flow in watersheds, as well as relative humidity. This study aims to review the evolution of the native forest cover, the trend in the flow of the Biobío River and the magnitude of the fires in the last 34 years. Through the processing and correction of satellite images from the years 1987, 2001, 2011 and 2021, in almost the entire province of Concepción in the Biobío region, we were able to define 8 types of land cover: native forest, bare soil, scrub, wetland, urban area, agricultural area, water and exotic plantation, and its variations over time with the Land Change Modeler tool. It is obtained that 34,034 ha of native forest have been lost, of which 88.87% migrated to forest plantation. Additionally, this loss of native forest is contrasted with the decrease in flow of the Biobío River, highlighting that 2017 is the year in which the most native forest is lost due to forest fires, and this coincides with the lowest average flow, reaching to observe 221.1 m³/s of flow at the mouth of the Biobío River, contrasted with the average for the period of time studied equal to 939.1 m³/s. This relationship becomes important due to the role of native forest cover and the available water in a basin. In parallel, an increase in the area affected by fire is observed, which favors the spread of exotic plantations over native forest. It should be noted that the lowest flow values coincide with the period with the largest area affected by fires. Equivalent to 2,706.9 occurred in 2017, according to the CONAF fire registry. Although there is a lack of rigor in the statistical analyzes that were carried out, it is undeniable that the high migration from native forest to forest plantation plays a relevant role in mega fires.

Key words: native forest, cover, Land Change Modeler.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen grandes problemas debido al cambio climático, alguno de ellos es los escasos hídrica o los grandes incendios, ambos fenómenos observables en la región del Biobío. En este contexto es importante analizar si el crecimiento de la industria forestal ha sido de manera poco sustentable en la región. El presente artículo busca describir de manera semicuantitativa cómo ha sido el cambio de cobertura de bosque nativo, estableciendo cuáles son las coberturas a las que ha migrado el bosque nativo y en qué zonas ha prevalecido la especie nativa.

Estos cambios de uso del suelo han provocado una serie de alteraciones en el balance hídrico en general (Huber & Iroumé

2008) y sustantivas modificaciones en los patrones hidrológicos en pequeñas cuencas hidrográficas y grandes cuencas; alterando la calidad y cantidad de agua que drena de ellas (Little et al., 2009).

Con el fin de analizar estadísticamente la respuesta hidrológica a este cambio en la cobertura, se analizan el caudal mínimo del Río Biobío. Adicionalmente se contrapone esta información con las superficies afectadas por incendios, en la provincia de Concepción exceptuando la comuna de Florida, entre los años 1987 al 2021 (ver Figura 1).

Para ello es importante definir en primera instancia los conceptos de forestación,

deforestación, degradación y regeneración, forestal (de bosque espeso a bosque claro) que se utilizarán en los siguientes apartados. que afectan negativamente a la masa o a la organización de las Naciones Unidas lugar y, en particular, reducen su capacidad para la Alimentación y la Agricultura (FAO de producción, se denominan degradación por sus siglas en inglés) define forestación forestal y se consideran una cosa distinta de como establecimiento de un cultivo arbóreo la deforestación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020). Lanly, (2003) define la deforestación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020). Cuando el establecimiento falla y se reitera, degradación como un proceso, el cual no se puede denominar propiamente implica necesariamente la reducción de un reforestación o regeneración natural. área forestal, sino más bien un decrecimiento Mientras que la deforestación es el cambio en su condición. Esto puede estar del bosque con agotamiento de la cubierta relacionado a uno o varios componentes del de copas arbóreas a menos del 10 por ecosistema forestal (cubierta vegetal, suelo, fauna, etc.) y sus interacciones.

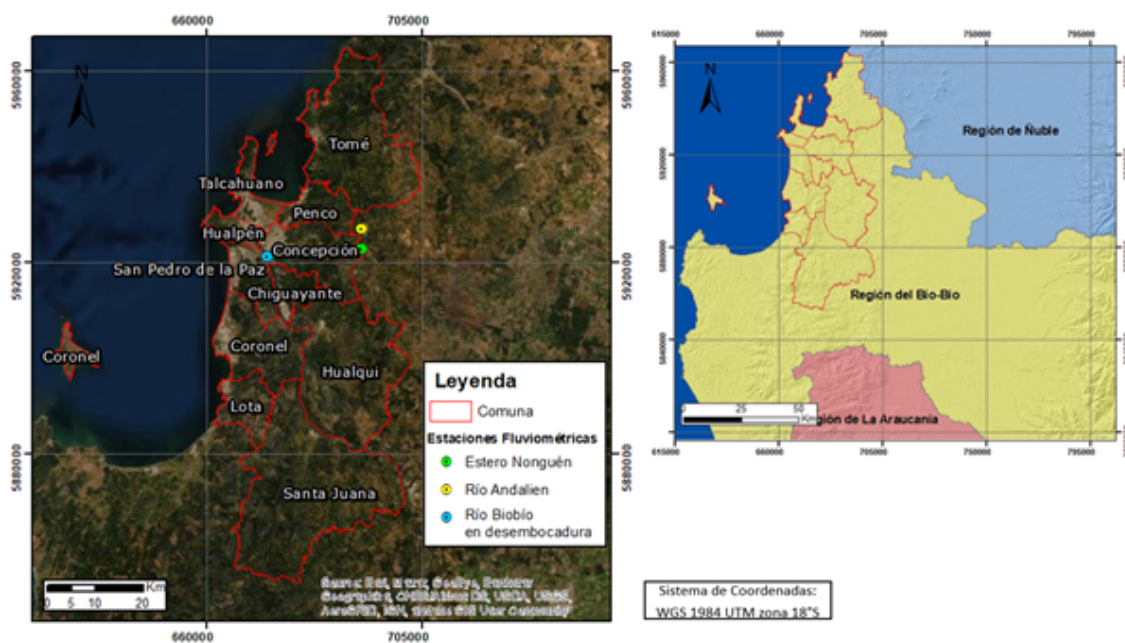


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio 2021. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de coberturas se realizó mediante el procesamiento de imágenes satelitales (Landsat 5 y 8) utilizando los softwares Envi, ArcGIS 10.7 e Idrisi SELVA. Los años de las imágenes corresponden a 1987, 2001, 2011 y 2021 y para obtener la variación de coberturas se trabajó con la herramienta Land Change Modeler del software Idrisi SELVA.

Como primeros resultados se presenta el resumen de la información extraída de las matrices de validación correspondientes, para identificar el grado de precisión de las coberturas que se identificaron. Posteriormente también se muestran las superficies de cambio, tanto de pérdida, ganancia y persistencia del bosque nativo en los últimos 34 años, además de a que cobertura

migra, en la zona de estudio. Luego se discute su relación con los aumentos de incendio forestal y la disminución del caudal del río Biobío.

MÉTODO

Análisis de coberturas

Para realizar el análisis de coberturas se trabajó con imágenes satelitales, de los años y área ya mencionados, las que son obtenidas del sensor Landsat 5 a excepción de la imagen 2021, obtenida de Landsat 8. Todas las imágenes tienen una resolución espacial de 30 m y una resolución espectral de 8 bit a excepción de la imagen satelital 2021 que es de 16 bit.

A estas imágenes se les realiza una corrección geométrica o reproyección con el software Envi 4.5 para pasar al sistema de referencia por defecto del satélite a WGS 84 UTM zona 18S.

Con el fin de evitar confusión al clasificar las coberturas, producto del efecto de la luz y sombra, se realiza una corrección topográfica según el método del factor de corrección C propuesto por Teillet et al., (1982) (ver Fórmula 1).

$$\text{Fórmula 1: } \rho_{h,i} = \rho_i \left(\frac{\cos \theta_i + C_k}{\cos \gamma_i + C_k} \right)$$

Donde:

$\rho_{h,i}$: es la reflectividad de un píxel en sentido horizontal.

ρ_i : la reflectividad de un píxel en la pendiente.

γ_i : es el ángulo de incidencia del sol sobre la escena.

C_k : Constante empírica para cada banda k que se relaciona con la rugosidad promedio de esa banda

Para obtener el C_k se utilizó el software Idrisi SELVA que requiere los siguientes ráster: imagen de sombras proyectadas (hillshade) e imagen de zona afectada por el efecto de luz y sombra con cobertura determinada. La imagen de sombras proyectadas se obtiene de un Modelo de Elevación Digital con resolución espacial de 30 m y sistema de coordenadas WGS 84 UTM zona 18S. La diferencia de la respuesta espectral entre el área con luz y la sombreada, permite identificar el grado de afectación del efecto luz y sombra para la cobertura determinada, valor que es extrapolado a toda el área de estudio.

Este proceso se realiza con la herramienta "regresión lineal" considerando la imagen de luz y sombra como la variable independiente y las bandas de cada imagen satelital como variable dependiente. El software calcula la ecuación generada en la regresión lineal, la que nos permite calcular el C_k de acuerdo con la siguiente fórmula 2:

$$\text{Fórmula 2: } C_k = \frac{B_k}{M_k}$$

Donde:

B_k : es la constante de la recta de regresión lineal

M_k : la pendiente de la recta de regresión lineal, los valores de C_k son distintos para cada Banda.

A la imagen resultante debe ser reclasificada para eliminar los valores ruido, es decir, valores digitales menores a 0 y mayores a 500.

Posterior a la corrección topográfica se realiza una corrección radiométrica utilizando el software Envi 4.5, con el objetivo de disminuir el efecto de la toma de la imagen producto del sensor, rugosidad o

movimiento de la tierra y poder comparar la respuesta espectral entre los diferentes satélites. El primer paso es llevar los números digitales de la imagen a los valores de energía original captados por el sensor, es decir, los valores de radiancia expresados en W/m², para eso se utiliza las siguientes fórmulas 3 y 4:

$$\text{Fórmula 3: } L_{\lambda} = G_{\text{rescale}} * L_{\text{cal}} + B_{\text{rescale}}$$

$$\text{Fórmula 4: } G_{\text{rescale}} = \left(\frac{L_{\text{MAX}\lambda} - L_{\text{MIN}\lambda}}{Q_{\text{calmax}}} \right)$$

Donde:

Q_{calmin} : Valor mínimo de píxel calibrado cuantificado (DN=0) correspondiente a $L_{\text{MIN}\lambda}$.

Q_{calmax} : Valor máximo del píxel calibrado cuantificado (DN=255) correspondiente a $L_{\text{MAX}\lambda}$.

$L_{\text{MIN}\lambda}$: Radiancia espectral que se escala a Q_{calmin} en W / (m²sr μm).

$L_{\text{MAX}\lambda}$: Radiancia espectral que se escala a Q_{calmax} en W / (m²sr μm).

B_{rescale} : $L_{\text{MIN}\lambda}$.

G_{rescale} y B_{rescale} son factores de escala específicos de cada banda, que se encuentran en los metadatos de las imágenes satelitales.

Luego a esta etapa se debe calcular la reflectancia, es decir, el porcentaje de energía incidente que es reflejada y captada por el sensor, lo que nos permite comparar respuestas espectrales entre sensores distintos. La fórmula 5 es la utilizada para pasar a reflectancia:

Donde:

$\rho\rho$: reflectancia planetaria sin unidad.

L_{λ} : radiancia espectral en la apertura del sensor.

d : distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas.

$ESUN_{\lambda}$: irradiancias solares exoatmosféricas medias.

θ_s : ángulo cenital solar en grados.

Con este paso se termina la etapa de preprocesamiento de las imágenes satelitales, es decir, las unidades para el análisis temporal de las imágenes están unificadas.

La clasificación supervisada fue realizada en *Idrisi SELVA* con un set de puntos de entrenamiento tomados en terreno, los que fueron complementados manualmente de acuerdo con la respuesta espectral de cada píxel. Los resultados de coberturas fueron reclasificados en 8 clases: plantación, bosque nativo, matorrales, agrícola, área urbana, suelo descubierto, humedales y agua, para las 4 imágenes satelitales.

Con otro set de puntos tomados en terreno se validan los resultados y se procede a calcular la precisión de la identificación de cada cobertura en cada imagen con las matrices de error, comparando la cobertura observada en terreno con la obtenida por la clasificación supervisada. Con los rúster resultantes se realiza el análisis temporal de variación de las coberturas con el software *Land Change Modeler*.

$$\text{Fórmula 5: } \rho\rho = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \text{Cos } \theta_s}$$

Análisis relación entre caudal y bosque nativo

Debido a la relación de la vegetación con la cantidad de agua disponible en el suelo, es que se busca comparar el caudal base del área de estudio con las variaciones de la cobertura de bosque nativo. Algunos de los autores que han estudiado el efecto positivo del bosque nativo sobre el caudal base son: Tapia et al. (2017) o Lara et al. (2021).

En situaciones donde no se tengan datos de la dinámica de las aguas subterráneas, se pueden realizar diferentes técnicas para obtener el caudal base, aportado exclusivamente por el acuífero, del caudal directo. La manera más simplificada se sostiene en que el caudal base se asocia a períodos sin precipitaciones (estiaje), donde el cauce es alimentado únicamente por la descarga de aguas subterráneas al cauce (Welderufael & Woyessa, 2010).

Debido a lo mencionado anteriormente se optó por analizar el caudal mínimo anual del río Biobío. Esto debido a que los valores mínimos se presentan en los meses de menor precipitación y por tanto estarán más próximos al caudal base que los de invierno. Los valores de caudal son extraídos del Explorador climático del CR2, en la estación Biobío en Desembocadura, perteneciente a la Dirección General de Aguas (DGA) con información desde 1970 al 2019, y dentro del periodo estudiado, es decir, desde 1987 al 2019 se registran 11.128, es decir, el 92,4% de los días del año presentan registro. Para completar la información se utilizó el método de regresión lineal simple apoyado de las estaciones fluviométricas Andalien y Nonguén (Figura 1), siguiendo la metodología propuesta por Caldera et al. (2016).

Catastro de incendios forestales

La ocurrencia y magnitud de los incendios se analizó en base a la superficie quemada por comuna extraída de los informes históricos de la CONAF.

Obteniendo un promedio anual de superficie afectada y un promedio por los intervalos de tiempo de los que se cuenta la variación de coberturas, para finalmente contrastarlo con las variaciones de caudal mínimo del río Biobío.

Resultados

Variaciones de superficie: bosque nativo de 1987 a 2021

Las matrices de validación se obtuvieron para cada año, indicando cuáles fueron las coberturas mejor y peor evaluadas, las matrices de cada año se pueden ver en el Anexo 1 y en la Tabla 1 se resume la matriz de cada año. Además, es posible calcular los índices de fiabilidad, que muestra la validación completa de la muestra y el índice Kappa que relaciona los puntos evaluados correctamente con los errores de comisión y omisión de cada cobertura.

Año	Índice Fiabilidad global (%)	Índice de kappa (%)	Mejor cobertura clasificada	Peor cobertura clasificada
1987	92,52%	91,33%	Matorral Humedal Agua	Área Urbana
2001	92,34%	91,11%	Agua	Suelo descubierto
2011	88,11%	85,45%	Humedal Agua	Matorral
2021	82,69%	79,7%	Agua	Suelo descubierto

Tabla 1. Resumen de datos obtenidos de las matrices de validación para cada imagen. Fuente: Elaboración propia.

En relación con la tabla 1 se puede apreciar que hay una buena clasificación para las coberturas de agua y humedal, mientras que las peores clasificadas fueron el área urbana y suelo descubierto. En general considerando los índices de fiabilidad global y kappa se pueden considerar válidas las superficies determinadas para las coberturas en los distintos años. Más en detalle y para interés de este análisis el error de comisión de las coberturas de plantación y bosque nativo están dentro del 6 al 14% mientras que el error de omisión se encuentra entre 3 y 8%.

El cambio neto de todas las coberturas entre 1987 al 2021 se observa en la figura 2. Resaltando que las coberturas con mayor pérdida corresponden a matorral y bosque nativo. Mientras que, las coberturas con mayor expansión corresponden a plantación, área urbana y en menor medida suelo descubierto.

El intercambio neto entre la cobertura de bosque nativo que ha sido traspasado o ganado de las demás coberturas en hectáreas (ha) entre 1987 al 2021 se sintetiza en la figura 2.

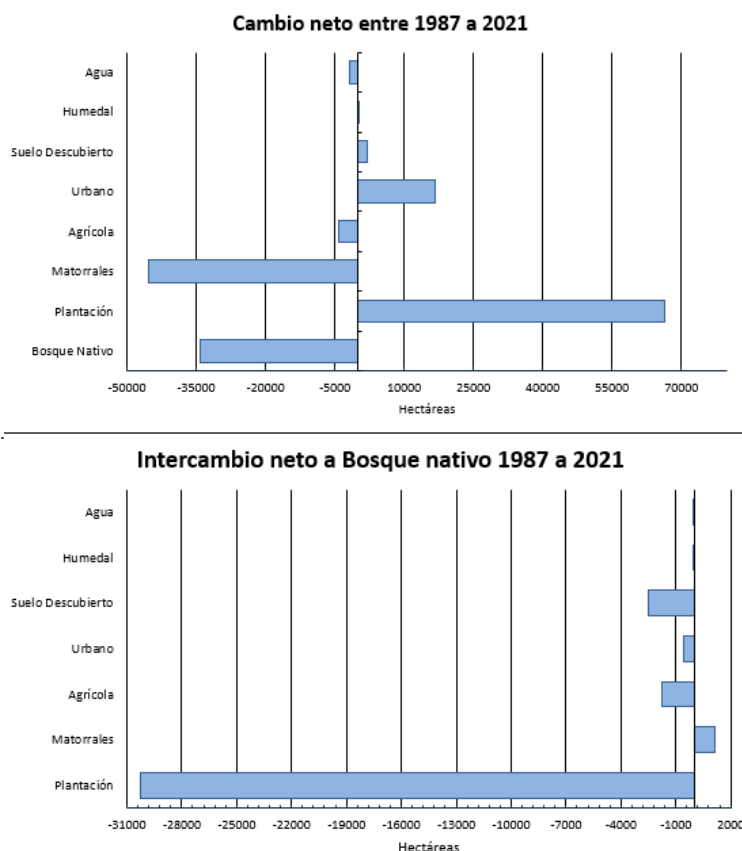


Tabla 2. (a) Cambio neto de cada cobertura entre 1987 al 2021. (b) Contribución al cambio neto del bosque nativo entre 1987 al 2021. Fuente: Elaboración propia.

A partir de las imágenes ráster es posible calcular la superficie en hectáreas de acuerdo con el número de píxeles clasificados como bosque nativo (ver Tabla 3). Se estima que la superficie de pérdida total de bosque nativo (ver Tabla 3) en todo ese periodo

corresponde a 34.053 hectáreas, siendo la cobertura de plantación la que más sustituyó al bosque nativo, mientras que este último solo se expande a costa de la cobertura de matorral.

Las superficies de cambio y persistencia de la cobertura de bosque nativo en los intervalos de tiempo 1987 a 2001, 2001 a 2011 y 2011 a 2021 se sintetiza en la tabla 3 y se observa en las figuras 3.

Superficie de bosque nativo (ha)	Año	Pérdida Bosque Nativo (ha)	Ganancia Bosque Nativo (ha)	Persistencia de Bosque Nativo (ha)
45.746 (1987)	1987-2001	19.820	9.622	25.893
35.537 (2001)				
13.932 (2011)	2001-2011	25.017	3.427	10.497
11.657 (2021)	2011-2021	7.782	5.516	6.141

Tabla 3. Superficies en hectáreas de bosque nativo para cada año y el valor de ganancia, pérdida y persistencia en cada intervalo. Fuente: Elaboración propia.

Para el periodo de 1987 al 2001 (ver Figura 3) se observa una superficie de pérdida igual a 19.820 ha, el cual es inferior a la persistencia y se concentra en las comunas de Hualpén, Penco y Tomé, mientras que la ganancia es de 9.622 ha y se concentra en las comunas de Santa Juana y Hualqui. La persistencia ocurre de manera transversal en el mapa y equivale a 25.893 ha concentrándose en la reserva Nonguén y en el sector de Penco.

Entre 2001 a 2011 (ver Figura 3) la pérdida equivale a 25.017 ha y ocurre en toda el área de estudio, concentrándose en Penco y Tomé. Por otro lado, la persistencia igual a 10.497 ha, menos de la mitad del año anterior, ocurre principalmente en la

reserva Nonguén y en la comuna de Santa Juana. La ganancia se reduce considerablemente, ocurriendo de manera dispersa en el área de estudio y teniendo mayor importancia en las comunas de Hualpén, Concepción y Santa Juana.

El último periodo evaluado, que comprende entre los años 2011 hasta 2021 (figura 3), la pérdida de bosque nativo continúa y ocurre de manera transversal en el área de estudio, pero con mayor fuerza en las comunas de Hualpén, Penco, Concepción y Santa Juana. La zona de persistencia se mantiene dentro de la reserva Nonguén, aunque de igual forma se observa pérdida en los bordes de la reserva.

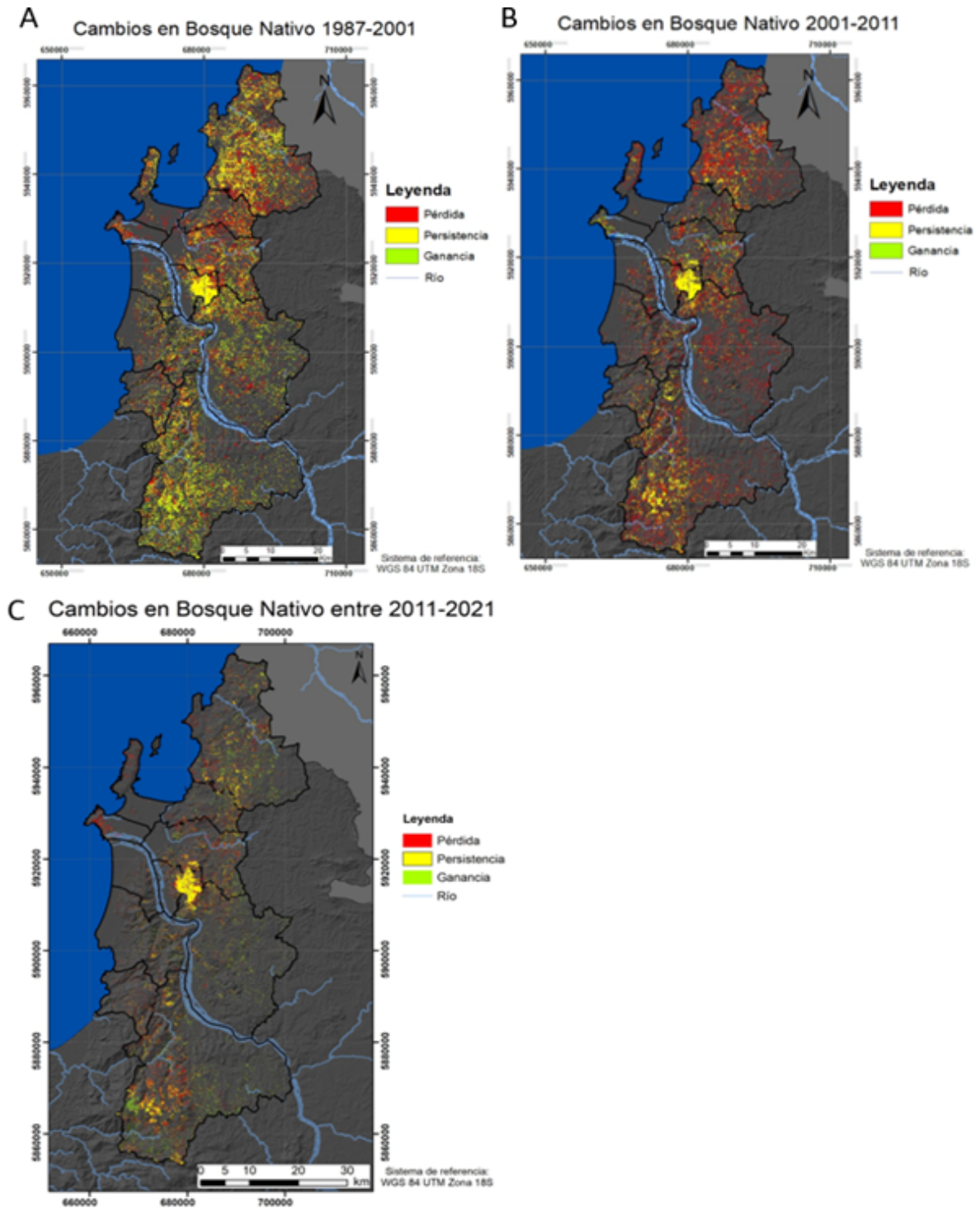


Figura 2. Cambios de pérdida, persistencia y ganancia entre 1987 a 2001, 2001 a 2011 y 2011 a 2021 en la cobertura bosque nativo. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar el intercambio de bosque separado, se puede observar lo siguiente nativo y las demás coberturas por (ver Figura 4):

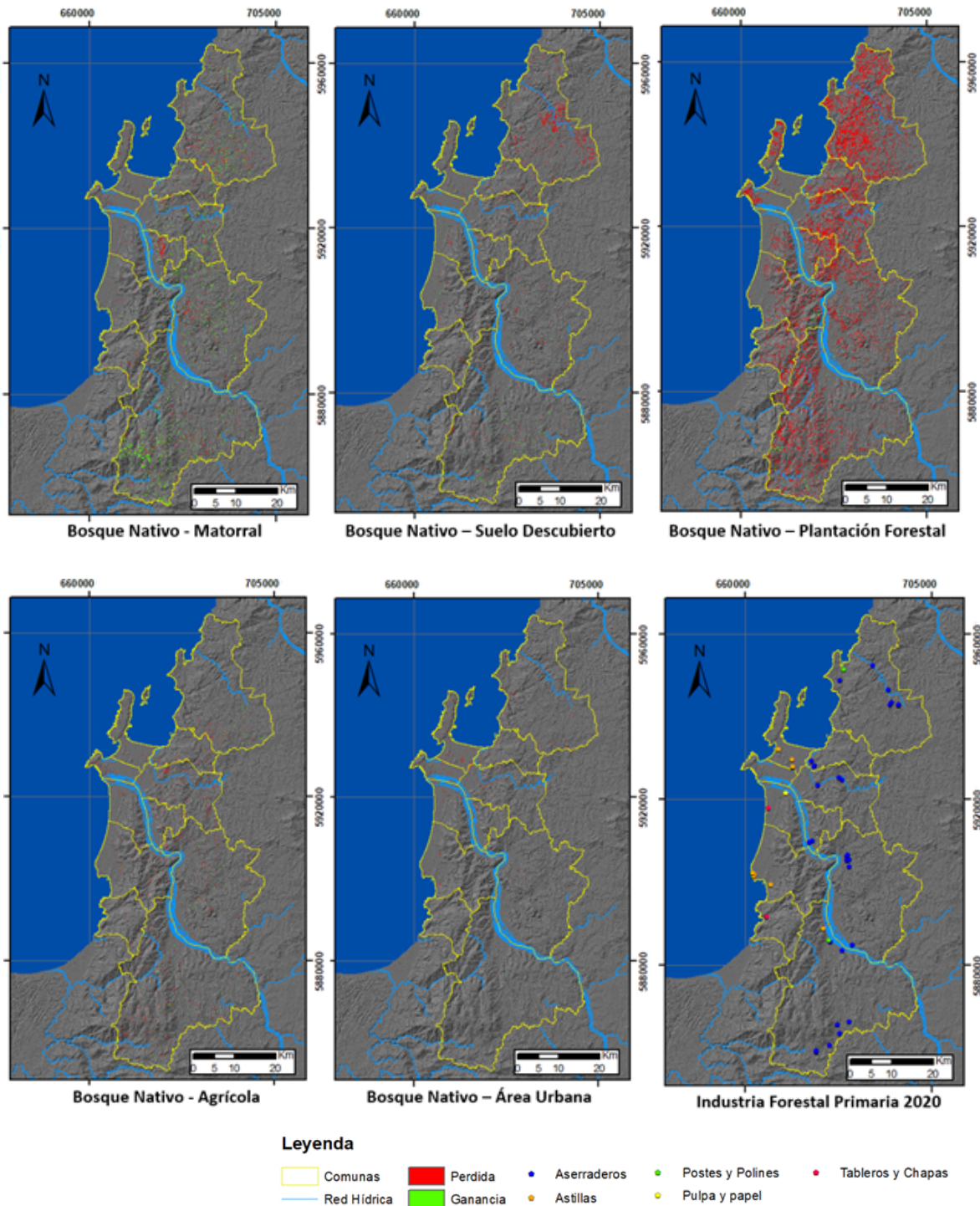


Figura 2. Intercambio de bosque nativo con otras coberturas entre los años 1987 al 2021 y distribución industria primaria forestal hasta el año 2020. Fuente: Elaboración propia.

i. Intercambio entre bosque nativo y plantación: es altamente notoria la transferencia de área que ha tenido el bosque hacia las plantaciones exóticas, siendo este proceso más bien homogéneo a lo largo de la zona estudiada y alcanzando extensiones superiores a las 30.000 hectáreas.

ii. Intercambio entre bosque nativo y matorral: la cobertura de matorral es la única donde se identifica una mayor transferencia positiva hacia el bosque nativo en las comunas de Santa Juana, Tomé y Hualqui, aunque igualmente dentro del área de estudio es acotada. Por otro lado, las pérdidas de bosque se concentran en la comuna de Chiguayante.

iii. Intercambio entre bosque nativo y suelo descubierto: con relación al suelo descubierto se observa una mayor transferencia de bosque hacia esta cobertura en la comuna de Tomé. Apenas poca ganancia en la comuna de Santa Juana.

iv. Intercambio bosque nativo a área urbana: Se observa que no existe ganancia de bosque nativo a expensas del área urbana, mientras que la pérdida de este se concentró en las comunas de Talcahuano, Concepción y Coronel, en ese orden.

v. Intercambio entre bosque nativo y área agrícola: Existe poca ganancia de bosque nativo a partir de terreno agrícola, la que se concentra en la comuna de Santa Juana. Mientras que la pérdida de bosque nativo en dicho intercambio se concentra en la comuna de Santa Juana, Hualqui y Concepción, en ese orden.

VARIACIONES DE CAUDAL Y COBERTURA DE BOSQUE NATIVO

Los caudales fueron extraídos de las estaciones Río Biobío en desembocadura y de acuerdo con lo que se describió en la metodología se completó los días faltantes mediante regresión lineal apoyada de las estaciones Nonguén y Andalien (figura 1). Los caudales del río Biobío se resumen en la tabla 4. El caudal anual promedio varía de 1.462,7 m³/s a 221,7 m³/s, registrados el 2009 y 2017 respectivamente. En cuanto a los valores mínimos, estos se registran los meses de enero y diciembre, oscilando de 302,0 m³/s a 32,6 m³/s respectivamente, registrados el 2009 y 2018 respectivamente.

	Caudal m ³ /s		N° días con registro	Caudal Corregido m ³ /s		R2 de mejor ajuste
	Promedio	Minimo		Promedio	Mínimo	
1987	999	210	365	999	210	-
1988	787	181	366	787	181	-
1989	761	191	365	761	191	-
1990	835	142	365	835	142	-
1991	958	50	365	958	50,4	-
1992	1285	148	340	1245	148	0,57
1993	1297	152	363	1294	152	0,68
1994	1078	176	365	1078	176	-
1995	1010	202	365	1010	202	-
1996	562	191	366	562	191	-
1997	1397	161	354	1387	161	0,507
1998	787	121	360	480	121	0,36
1999	620	33	339	696	166	0,67
2000	1013	166	366	1013	32,6	-
2001	1308	145	359	1299	145	0,56
2002	1330	128	365	1330	128	-
2003	951	142	365	951	142	-
2004	923	227	366	923	227	-
2005	1233	194	365	1233	194	-
2006	1285	277	365	1285	277	-
2007	1005	33	353	730	32,6	0,44
2008	1098	185	366	1098	185	-
2009	1463	302	294	1494	302	0,34
2010	517	210	225	538	210	0,68
2011	951	274	204	874	274	0,44
2012	571	187	355	566	187	0,48
2013	690	189	356	688	189	0,67
2014	1223	528	253	200	200	0,64
2015	724	109	365	724	109	-
2016	385	159	334	385	159	0,38
2017	222	206	366	222	206,2	-
2018	939	33	212	504	32,6	0,36
2019	727	204	218	645	204	0,62

Tabla 3. Caudal anual promedio y mínimo, cantidad de días medidos, valor promedio corregido y R2 de cada regresión lineal. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la interrelación de los caudales de cada estación se aprecia que el coeficiente de determinación o R^2 es mayor para la comparación del Río Biobío con Río Andalien que con el Estero Nonguén, a excepción del 2016, donde la estación Andalien tiene solo 133 días con registro y por tanto no permite realizar una buena correlación. Por tanto, se puede señalar que las variaciones en el caudal del Río Biobío en la desembocadura con el río Andalien tienen una mejor correlación que con el

estero Nonguén. Los gráficos de dispersión utilizados para la regresión lineal se pueden ver en el Anexo 2.

Con el fin de comparar las variaciones del caudal mínimo con las observadas en la cobertura de bosque nativo se realizó un promedio por intervalo de tiempo analizado, es decir, para 1987 al 2001, 2001 al 2011 y 2011 al 2021. Los resultados de esta superposición de información se pueden ver en la tabla 5 y figura 5.

Intervalo clasificado	Bosque Nativo (ha)		Mínimo (m ³ /s)
	Perdida	Ganancia y Persistencia	
1987 a 2001	1.982	35.515	151
2001 a 2011	25.017	13.924	192
2011 a 2021	7.782	11.657	175

Tabla 5. Superficie de persistencia más ganancia y pérdida de bosque nativo por intervalo estudiado y caudal mínimo. Fuente: Elaboración propia.

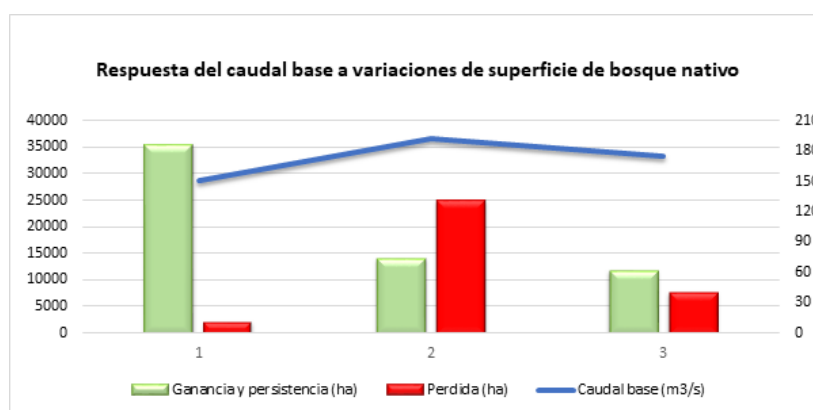


Figura 5. Gráfico de superficie de bosque nativo: Pérdida y ganancia más persistencia por intervalo de tiempo estudiado, superpuesto con la evolución del caudal mínimo promedio por intervalo. Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que el caudal mínimo promedio por intervalo no tiene una tendencia muy clara, sin embargo, si se ve que entre el intervalo I al II existe un aumento sustancial de este promedio, mientras entre el intervalo II al III existe una disminución de este.

INCENDIOS FORESTALES Y BOSQUE NATIVO

De acuerdo con el catastro de incendios forestales de CONAF la comuna que registra más superficie quemada de

bosque nativo es Concepción, concentrándose principalmente en los años 2016 y 2017, seguida por Tomé durante 1987 y 1989.

Es interesante observar que la superficie de bosque nativo quemada de acuerdo con CONAF entre 1987 al 2021 es de 14.000 ha, mientras que por Land Change Modeler se calcula una pérdida neta de bosque nativo de aproximadamente 38.864 ha, lo que significa que 36,02% de la pérdida de bosque nativo se debe a incendios. De lo anterior es posible sugerir que la tala es el factor con mayor peso en la deforestación de bosque nativo.

Jobbágy et al. (2013) estudia el efecto que tiene el reemplazo de pastizales naturales por plantaciones de *Pinus elliot* en el

rendimiento hídrico de una cuenca, concluyendo que provoca entre otras cosas, una notable reducción del caudal base, resultados muestran que el rendimiento promedio de las cuencas donde se reemplazó el pastizal fue 28% menor en comparación con aquellas en las que se había conservado el pastizal natural. Por tanto, se puede afirmar que existe una relación entre la disminución de bosque nativo y la disminución del caudal base en una cuenca.

En base a lo anterior, es que se busca contrastar el caudal mínimo del río Biobío con los episodios de incendios forestales, observando que posterior a incendios que afecten grandes superficies de bosque nativo existe una disminución en el caudal mínimo, esto se aprecia posterior a los incendios de 1988, 1999 y 2017.

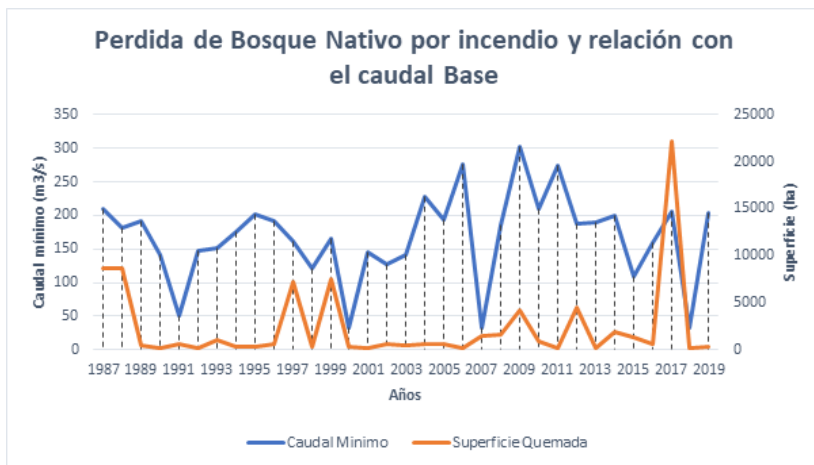


Figura 5. Superficie de Bosque nativo afectada por incendios, en la provincia de Concepción registro histórico CONAF; obtenidos de www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/, Caudal anual mínimo del río Biobío en desembocadura río Biobío, obtenidos del CR2 <https://explorador.cr2.cl/>. Y superficie en porcentaje respecto a 1987 de bosque nativo. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

A partir de los resultados expuestos toma relevancia el planteamiento de las causas de esta condición imperante que afecta al bosque nativo en el área de estudio y que, de acuerdo con el informe elaborado en 2018 por la Oficina de estudios y políticas agrarias (ODEPA), esta situación es extrapolable al resto de la región del Biobío, dado que es la región forestal más importante del país, donde se ubica la mayor proporción de plantaciones exóticas (36,3%).

En primera instancia se destacan la introducción de plantaciones exóticas como una de las causas más notorias en la sustitución de bosque nativo a especies como *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* principalmente Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA, 2018).

La normativa en torno a la industria forestal se remonta desde la época colonial, pero no fue hasta 1931 con la Ley de Bosques que se establece el primer cuerpo que centraliza la normativa legal forestal en una sola unidad (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2008). Sin embargo, esta ley presentaba dificultad al ser muy genérica y por no resolver con normativas a situaciones de manejo y de formaciones forestales existentes en el país. Por lo que posteriormente surge el Decreto Ley 701 en el año 1974. Este decreto exige mantener la superficie forestal del país al obligar a reforestar cada superficie cortada y por otro lado define que regirá el uso de bosques, sin embargo, no diferencia plantación exótica de bosque nativo. Por lo que esta normativa se tradujo en un fomento en la industria forestal, más que en una protección de bosque nativo. En el año 1990 un informe de CONAF titulado "Criterios para enfrentar

la sustitución del bosque nativo en la VIII Región" indica que los recursos forestales del país están constituidos principalmente por bosques nativos naturales, representando casi el 85% de la superficie y volumen total de los recursos forestales. Sin embargo, ya se declara que la situación en la región del Biobío es diferente, dado que hasta 1990 las plantaciones exóticas predominan sobre el bosque nativo tanto en superficie como en volumen, donde este último se encuentra prácticamente agotado. Para llevarlo a cifras, en este informe se presenta que las plantaciones exóticas conforman una superficie de 592.448 ha. versus las 401.700 ha de bosque nativo. En la provincia de Concepción los bosques nativos se encuentran altamente intervenidos, degradados y con individuos en mala forma (CONAF, 1990).

A pesar de que en los años 90 ya se comenzaba a visualizar los efectos negativos de la industria forestal, esto no impidió que se incrementara en las décadas siguientes (ver Figura 3 y Tabla 2), dado que a pesar de los intentos en formular e implementar políticas no existía una ley que protegiera a las especies nativas. Recién el 11 de julio del año 2008 se promulga finalmente la ley N° 20.283 sobre "Recuperación del bosque nativo y fomento forestal", que comenzó su tramitación el año 1992. En ella se destaca el artículo 19° que indica la prohibición de corta, eliminación, destrucción o descepado de individuos de las especies vegetales nativas (Biblioteca Congreso Nacional de Chile, 2008). Llama la atención en particular que a pesar de la promulgación de la ley no existan esfuerzos más intensos y visibles en reforestar la región con flora nativa para fomentar su recuperación. Hacia el año 2020 se mantiene la industria primaria forestal como una de las actividades con mayor fuerza económica y hasta el 2021

(ver Tabla 3) las pérdidas de bosque nativo siguen siendo mayor que las ganancias.

Otro eje interesante para abordar en este artículo es con respecto a los incendios forestales que han azotado la zona en el último tiempo y sus consecuencias.

Para que ocurran incendios forestales a escala de paisaje se necesitan cuatro condiciones (Bradstock, 2010):

1. La presencia de combustible espacialmente continuo.
2. Que el combustible esté lo suficientemente seco como para quemarlo.
3. Una fuente de ignición (por ejemplo, rayos o causas antropogénicas).
4. Condiciones climáticas favorables a la propagación del fuego.

En ecosistemas de alta biomasa, como las plantaciones de pino y eucaliptos que han aumentado su superficie entre 1987 al 2021, por lo general se cumple la primera condición, excepto en los primeros años posteriores a un incendio u otra perturbación. Además, mientras los bosques nativos no poseen mecanismos de defensa contra el fuego, las plantaciones de coníferas se ven favorecidas en términos de propagación y regeneración frente a los incendios (Haltenhoff, 2010).

La pérdida de bosque nativo está relacionada con una disminución en el caudal base de la cuenca y por tanto en las condiciones de humedad de esta, es decir,

existe una relación entre la proliferación de plantaciones exóticas a costa de bosque nativo y los grandes incendios forestales.

Los resultados del análisis de caudal e incendios forestales dan pie a la hipótesis de que posterior a grandes incendios se manifiesta una pérdida del caudal base y esta alcanza su pick de uno o hasta 3 años posterior al episodio. Sin embargo, es importante discutir la simplificación que se realiza en el artículo para abordar el caudal base, pues los datos de caudal son diarios, es decir, están influenciado por lo que sucede en la cabecera del río como por los eventos meteorológicos. Si bien se estudia el caudal mínimo, para minimizar el efecto de las precipitaciones, se desconoce el efecto del deshielo en la cabecera u otros fenómenos antrópicos fuera de la cuenca que puedan tener repercusiones en el caudal del río Biobío.

Sería ideal contar con datos de nivel piezométrico o freático a nivel de décadas, para así contrastar efectivamente si las plantaciones exóticas tienen una responsabilidad en la disminución del recurso hídrico subterráneo. Lamentablemente los datos de nivel estático de las captaciones de aguas subterráneas son registros aisladas, no de carácter sistemático en el tiempo.

Pese a eso, es posible indicar la coincidencia de la disminución del caudal base de los años 1991, 2000 y 2018, posterior a la pérdida de grandes superficies de bosque nativo producto de incendios.

CONCLUSIONES

El bosque nativo ha disminuido su superficie dentro del área de estudio en 34.053 ha en los últimos 34 años, lo que representa aproximadamente un 75% de la cobertura para 1987. Las variaciones responden a diferentes procesos de dinámica agrícola, urbanización y forestación, siendo este último el de mayor importancia en el área de estudio, donde el intercambio de especies nativas a plantaciones exóticas fue desmesurado. La disminución de bosques nativo trae consigo la pérdida de diversidad biológica, que puede percibirse en la discusión de recursos no madereros como lo son frutos u hongos. Adicionalmente a los productos comerciales que entregan los bosques nativos, estos también

tienden a mantener y regular el caudal base de una cuenca y aumentan la humedad ambiental, lo que reduce el riesgo de grandes incendios.

Es importante destacar que la persistencia de bosque nativo para el último periodo estudiado se concentra en gran medida en la reserva Nonguén, otorgando una importancia a las figuras legales y leyes estatales que favorezcan la conservación y restauración de estas coberturas. Sin embargo, estas deben ser acompañadas de recursos para la fiscalización, debido a que, si bien es ilegal la tala de bosque nativo, esta corresponde al factor con mayor peso en la deforestación de bosque nativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biblioteca Congreso Nacional de Chile. (2008). *Recuperación del bosque nativo y de fomento forestal, Ley N°20.283, Art 19*. Recuperado el 10 de julio de 2021, de http://www.centralenergia.cl/uploads/2012/03/Bosque_nativo_historia_ley.pdf
- Bradstock, R. A. (2010). *A biogeographic model of fire regimes in Australia: Current and future implications*. *Global Ecology and Biogeography*, 19(2), 145–158.
- Caldera H., Piyathisse V., y Nandalal K. (2016). *Comparison of Methods of Estimating Missing Daily Rainfall Data*. *ENGINEER*, 49 (04), pp. 1-8.
- CONAF. (1990). *Criterios para enfrentar la sustitución del bosque nativo en la VIII Región* (p. 73). Corporación Nacional Forestal. Recuperado el 14 de julio de 2021, de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/10678/CONAF-0072.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CONAF (s.f) *Estadística histórica CONAF*. Corporación Nacional Forestal. Recuperado el 25 de julio del 2021, de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>.
- Coronado, O., Triana, J., & Coronado, J. (2012). *Procedimiento para estimar hidrogramas de crecientes utilizando únicamente información hidrométrica*. XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla.
- CR2. (s.f) *Explorador Climático*. Recuperado el 08 de septiembre de <https://explorador.cr2.cl>
- Haltenhoff, H. (2010). *Los grandes incendios forestales en Chile 1985-2009* (Manual de Trabajo 539, 79-7). Corporación Nacional Forestal.
- Huber A, Iroumé A, Bathurst J. 2008. *Effect of Pinus radiata plantation on water valance in Chile*. *Hidrol. Process* 22: 142-148
- Jobbágy, E., Acosta, M. y Nosoetto, M. (2013). *Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba, Argentina*. *Ecología Austral*, 23(2):87-96
- Lanly, J. P. (2003). *Deforestation and forest degradation factors*. 75-83. Recuperado el 10 de julio de 2021, de <http://www.fao.org/3/xii/ms12a-e.htm>
- Lara, A., Jones, J., Little, C., & Vergara, N. (2021). *Streamflow response to native forest restoration in former Eucalyptus plantations in south central Chile*. *Hydrological Processes*, 35(8).
- Little C, Lara A, McPhee, J, Urrutia R. 2009. *Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile*. *Journal of Hydrology* (374) 162-170
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2018). *Región del Biobío, información regional 2018*. Recuperado el 15 de julio de 2021, de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Bio-bio.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *Definiciones FAO. Anexo 2: Definiciones*. Recuperado el 10 de julio de 2021, de <http://www.fao.org/3/W4345S/w4345s08.htm>

ANEXO 1: MATRICES DE VALIDACIÓN PARA CADA AÑO

AÑO 1987:

Validación de clasificación Año 1987		Cobertura / uso observado										
		Bosque Nativo	Plantación Exótica	Área Urbana	Área Agrícola	Suelo Desnudo	Matorral	Humedal	Cuerpo de Agua	Total	Exactitud Usuario	Error Comisión
Cobertura/ Uso observado	Bosque Nativo	146	6	0	0	0	0	0	0	152	96,05	3,95
	Plantación exótica	9	127	0	0	0	0	0	0	136	93,48	6,62
	Área Urbana	0	0	100	2	13	0	12	1	128	78,13	21,88
	Área Agrícola	1	0	0	132	0	0	3	0	136	97,06	2,94
	Suelo Desnudo	0	0	7	9	94	1	0	0	111	84,68	15,32
	Matorral	0	0	0	0	0	81	0	0	81	100,00	0,00
	Humedal	0	0	0	0	0	0	47	0	47	100,00	0,00
	Cuerpo De Agua	0	0	0	0	0	0	4	65	65	100,00	0,00
Exactitud												
Total		156	133	107	143	107	82	62	66			
Error producto		93,59	95,49	93,46	92,31	87,85	98,78	75,81	98,48			
omisión		6,41	4,51	6,54	7,69	12,15	1,22	24,19	1,52			

Total, muestras	856
Total, aciertos	792

	Valor	Porcentaje%
Fiabilidad Global	0,9252	92,52
Indice Kappa	0,9133	91,33

AÑO 2021:

Validación de clasificación Año 2021		Cobertura / uso observado										
		Bosque Nativo	Plantación Exótica	Área Urbana	Área Agrícola	Suelo Desnudo	Matorral	Humedal	Cuerpo de Agua	Total	Exactitud Usuario	Error Comisión
Cobertura / Uso observado	Bosque Nativo	261	24	0	0	0	0	0	0	285	91,58	8,42
	Plantación exótica	10	273	0	0	0	0	0	0	136	93,49	6,51
	Área Urbana	0	0	361	0	52	0	12	25	128	75,05	24,95
	Área Agrícola	1	0	0	269	0	3	3	0	136	98,90	1,10
	Suelo Desnudo	0	0	5	10	81	91	0	0	111	41,54	58,46
	Matorral	0	0	0	0	3	61	0	0	81	63,54	36,46
	Humedal	0	0	1	0	0	0	47	0	47	98,08	1,92
	Cuerpo De Agua	0	0	0	0	0	0	4	153	153	100,00	0,00
	Total	271	297	367	279	136	155	143	178			
Exactitud producto	96,31	91,92	98,37	96,42	59,56	39,35	35,66	85,96				
Error omisión	3,69	8,08	1,63	3,58	40,44	60,65	64,34	14,04				

Total, muestras	1826
Total, aciertos	1510

	Valor	Porcentaje %
Fiabilidad Global	0,8269	82,69
Indice Kappa	0,7970	79,70

ANEXO 2: GRÁFICOS DE DISPERSIÓN ENTRE LOS CAUDALES DEL RÍO BIOBÍO EN LA DESEMBOCADURA Y LAS ESTACIONES ANDALIEN Y NONGUÉN, QUE PRESENTAN EL MAYOR R².

