



APUNTE

El agua y los ecosistemas boscosos en Chile: información para el desarrollo del sector forestal.

Christian Little C.^{1*}

¹ Instituto Forestal, Fundo Teja Norte S/N, Valdivia, Chile. clittle@infor.cl

*Autor de correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.552>

Recibido: 18.11.2021; Aceptado 22.12.2021

RESUMEN

Se presenta una sistematización de la información contenida en una serie de trabajos que estudian, a escala de parcelas, el efecto que tienen los bosques nativos y las plantaciones forestales de especies exóticas sobre balance hídrico en la zona centro-sur de Chile. Se establecen algunas relaciones entre las características de dichos ecosistemas boscosos y algunos componentes de la redistribución de las precipitaciones, las cuales dan cuenta de una heterogeneidad de situaciones y resultados. Se entregan algunos antecedentes sobre la eficiencia de las plantaciones de *Pinus radiata* en el uso del agua para la producción de madera, la cual refleja la importancia de la dinámica de la vegetación en el ciclo productivo y su interacción con el clima y el suelo. Se concluye sobre la importancia de distinguir los resultados para interpretar adecuadamente el efecto de la cobertura boscosa sobre el balance hídrico y la necesidad de abandonar las comparaciones entre bosques nativos y plantaciones forestales en base a una conceptualización genérica de éstos. Lo anterior permitirá develar la vocación de uso los territorios, reconociendo que la heterogeneidad ambiental en la cual se desarrollan los ecosistemas boscosos representan una oportunidad para avanzar en desarrollo del sector forestal y los nuevos desafíos de la investigación aplicada en hidrología forestal.

Palabras clave: agua, plantaciones forestales, bosques nativos, madera, ordenamiento territorial.

SUMMARY

This review contain systematized information of different studies at plot scale showing the effect of native forests and forest plantations of exotic species on water balance in the south-central region in Chile. Relationships between the characteristics of these forest ecosystems and some components of rainfall redistribution, shown a heterogeneity of effects and results. Information about water-use efficiency of *Pinus radiata* plantations reflect the importance of vegetation dynamics in the productive cycle and its interactions with climate and soil. The manuscript concludes on the importance of analyzing the results under different perspectives and interpret the effects of forest cover on water balance, as well as the need to abandon the comparisons between native forests and forest plantations based on generic conceptualizations. The foregoing will reveal the potential of territories, recognizing that environmental heterogeneity of forest ecosystems represent an opportunity to promote the development of the forest sector, as well as the solutions to new challenges of applied forest hydrological research.

Key words: water, forest plantations, native forest, timber, land use planning.

INTRODUCCIÓN

Entender el ciclo hidrológico y su relación con los ecosistemas boscosos ha sido una de las principales motivaciones de numerosos trabajos desarrollados en Chile y el mundo en las últimas décadas (Jones *et al.*, 2016). Para ello, comúnmente se ha recurrido al estudio del balance hídrico, siendo la idea central - aplicable a cualquier sistema ecológico inserto en un área geográfica particular- que la suma de los flujos de agua que entran y salen de dicho sistema sea equivalente a cero (Huber *et al.*, 2008). Generalmente dichos flujos son cuantificados a distintas escalas temporales (ej. años, meses, días, horas, etc.) y espaciales (ej. cuencas, parcelas, árboles individuales, etc.), lo cual resulta determinante para entender la transformación del agua en distintos contextos biofísicos y antrópicos (Little & Lara, 2010).

Estudios desarrollados en el centro-sur de Chile han informado de importantes relaciones entre parámetros tales como la edad, densidad o el área basal de los bosques, por ejemplo, con el agua que es interceptada por el follaje de los árboles (Soto-Schönherr & Iroumé, 2016) o la que alcanza a llegar al suelo para ser aprovechada por la vegetación y la recarga de la napa freática (Huber *et al.*, 2008). Estas relaciones, comúnmente revisadas en estudios a escala de parcelas experimentales, dan cuenta de los cambios que ocurren en los componentes del balance hídrico dependiendo del tipo, composición y estructura del ecosistema. Otros enfoques sobre el estudio del impacto de los ecosistemas forestales en el balance hídrico, esta vez como usos de la tierra insertos en cuencas hidrográficas, también muestran relaciones con la cantidad y calidad del agua que fluye a través de los cursos de agua (Iroumé & Palacios, 2013; Little *et al.* 2009; Frene *et al.*, 2020; Álvarez *et al.*, 2019).

Si bien existe abundante información sobre la relación de ecosistemas boscosos y el agua, también se reconocen limitaciones para que esta información responda a preguntas sobre el comportamiento agregado de las escalas temporales y espaciales, o bien para establecer comparaciones en o entre distintos ecosistemas. Lo anterior, dada la compleja interacción de variables que determinan la tasa de evaporación o evapotranspiración neta por parte de la vegetación, como son: las características del suelo (capacidad de agua aprovechable e infiltración) (Abrahamsom *et al.*, 1998), la composición y estructura de la cubierta vegetal (especies, extensión y eficiencia del sistema radicular, superficie foliar, disposición y estructura de las hojas y comportamiento de los estomas) (Huber & García, 1999) y la condición climática (radiación solar, régimen de precipitaciones, temperatura y humedad del aire) (Calder, 1992).

Pese a las limitaciones señaladas anteriormente, en la opinión pública se ha instalado un debate respecto al rol que cumplen los ecosistemas boscosos en el ciclo del agua, observándose visiones contrapuestas sobre los beneficios o externalidades que tendrían las plantaciones forestales de rápido crecimiento o los bosques nativos. Así, preguntas tales como, cuánta agua requieren los árboles para producir madera (Huber *et al.*, 2008), cómo optimizar la producción conjunta de madera y la provisión de agua para otros usos (Jones *et al.*, 2016) o cómo producir la mayor cantidad de madera con el menor consumo de agua, resultan ser nuevos desafíos para la ciencia aplicada.

Considerando lo antes expuesto, esta revisión tiene como objetivo proporcionar una serie de antecedentes técnicos que permitan aportar al entendimiento del rol que cumplen las plantaciones y los bosques nativos en el ciclo del agua y la producción forestal. Para lo anterior, la primera parte proporciona algunos antecedentes que contextualizan la importancia de ambas cubiertas boscosas en el contexto del territorio en que se desarrollan, posteriormente se presenta una revisión de los trabajos desarrollados en Chile en torno al balance hídrico a escala de parcelas, incluyendo un breve análisis de la información contenida en dichos trabajos y, finalmente, se entregan algunas conclusiones y recomendaciones en torno a los nuevos desafíos que enfrenta el sector forestal.

LOS ECOSISTEMAS FORESTALES Y EL AGUA

En Chile, los ecosistemas forestales dominados por especies arbóreas se desarrollan principalmente en la zona centro-sur, sur y Patagonia entre los 33° – 56°S. Estos cubren un área aproximada 17,3 millones de hectáreas, de las cuales un 15% corresponde a plantaciones forestales y el 85% a bosques nativos (INFOR, 2018), siendo estos dos tipos de ecosistemas contrastantes desde el punto de vista del origen, procesos ecológicos y funciones que demanda la sociedad de ellos. En el caso de las plantaciones forestales, en su mayoría están compuestas por las especies exóticas *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*, establecidas en terrenos de aptitud preferentemente forestal de la Cordillera de La Costa y parte del Llano Central de la zona Centro-Sur de Chile (37° – 41° S). En esta área, las plantaciones presentan elevados rendimientos en términos de la producción de biomasa, razón por la cual se les ha catalogado como plantaciones de rápido crecimiento, cultivándose en periodos cortos entre el establecimiento de los árboles y su cosecha (10 a 25 años) (Cubbage *et al.*, 2007).

En el mismo rango latitudinal en que se encuentran las plantaciones, también se desarrollan bosques nativos. Sin embargo, éstos en su mayoría se encuentran ubicados en la cordillera de Los Andes, mientras que en el Valle Central y la cordillera de La Costa son escasos y presentan problemas de

conservación debido a la elevada presión antrópica en el uso del territorio. Estos bosques han sido clasificados en Tipos Forestales (CONAF *et al.*, 1999) y se caracterizan por presentar distintas asociaciones de especies en función de la interacción de éstas con el clima y el tipo de suelo (Donoso, 1981; Gajardo, 1994; Luebert & Pliscoff, 2004).

La mayor parte de los ecosistemas forestales se encuentran en terrenos de propiedad privada (71% del total) los cuales son utilizados para la producción bienes y servicios, algunos de los cuales se transan en los mercados nacionales e internacionales (INFOR 2020). Para el caso de las plantaciones forestales, la producción de biomasa es la base de la industria de la celulosa y papel, madera aserrada, tableros y otros productos de gran impacto en la economía nacional (INFOR 2020). En el caso de los bosques nativos, la producción de biomasa se destina principalmente a la leña, madera aserrada y astillas para la producción de tableros de partículas (INFOR 2020). Respecto a los servicios, a las plantaciones se les ha asignado un rol en la fijación de carbono atmosférico y la protección del suelo, en tanto a los bosques nativos, una serie de beneficios asociados a la conservación de la biodiversidad, como por ejemplo las oportunidades de recreación, regulación del clima, protección de suelo, provisión de agua en calidad y cantidad, entre otros, como se especifica en la Política Forestal 2015-2035 (Consejo de Política Forestal, 2015).

Pese a los beneficios económicos, sociales y ambientales asociados al uso de los ecosistemas forestales con fines exclusivamente asociados a la producción de biomasa, tanto a los bosques nativos como a las plantaciones forestales, se les ha asignado un conjunto de externalidades que han tendido a relativizar tales beneficios. Uno de los más importantes, y de mayor sensibilidad social, es el impacto sobre el recurso hídrico (agua en calidad y cantidad para satisfacer diversas demandas sociales), sin embargo, más que a las especies que componen los ecosistemas, el impacto estaría asociado a la gestión que realiza el ser humano sobre ellos. En el caso de las plantaciones forestales, la gran extensión de la masa forestal e intensidad de los tratamientos silvícolas (Ej. talas rasas de gran tamaño), la proporción del uso y ubicación de las plantaciones en las pequeñas cuencas hidrográficas, la construcción de los caminos, los esquemas de cosecha, etc., impactan en la cantidad y calidad de agua. Por ejemplo, en la disminución de los caudales observada en cuencas hidrográficas, especialmente en la época estival (Little *et al.*, 2009, Iroumé & Palacios, 2013) y un incremento en el arrastre de sedimentos luego de la cosecha forestal (Iroumé *et al.* 2006, Iroumé *et al.* 2010). Asimismo, en el caso de los bosques nativos, los tratamientos silvícolas, como las cortas intermedias o finales, provocan cambios en las tasas de evapotranspiración (salida de agua del sistema), ya sea por el consumo de agua por parte de los árboles (transpiración) o pérdidas de agua por evaporación desde las copas. Así también, la construcción de caminos genera un impacto en la calidad del agua por el arrastre de sedimentos (Oyarzún *et al.*, 2007).

En resumen, la evidencia científica advierte una estrecha relación entre la composición y estructura de los ecosistemas forestales y el agua. A las plantaciones forestales se le asocia una estructura simple, cuya relación está determinada por la intensidad del manejo silvícola y prácticas de manejo en el ciclo de producción forestal, siendo un elemento clave el corto período entre la forestación y la cosecha de los árboles. Por su parte, a los bosques nativos se les asocia a sistemas complejos que proporcionan los nichos que permiten el adecuado funcionamiento de los ciclos naturales, incluyendo la protección del suelo que almacena y retiene el agua.

La advertencia antes señalada también sostiene que, dada la complejidad inherente a los sistemas ecológicos afectados por el clima (régimen de precipitaciones y temperaturas), la dinámica espaciotemporal del uso de la tierra y la interacción de éstas con las demandas sociales sobre el recurso hídrico, es imposible generar respuestas únicas y generalizadas respecto a la regulación de la cantidad y calidad del agua en función de las características de los ecosistemas. Por el contrario, dichas respuestas deben ser específicas y basadas en la interacción de los ecosistemas y las particularidades de los territorios.

Sistematización de Información sobre Balance Hídrico en los Ecosistemas Forestales de Chile.

Una búsqueda de información asociada a la relación de los componentes del balance hídrico y el tipo de cubierta boscosa en Chile, arrojó que entre los años 1996 y 2006 se desarrollaron 61 estudios (Figura 1).

De ellos, la mayor parte corresponde a ensayos que revisan el comportamiento de la distribución de la lluvia dentro y fuera del ecosistema boscoso, a partir de una propuesta metodológica descrita por Huber *et al.* (2008). Los estudios proporcionan una gran cantidad de información respecto a variables biofísicas, siendo de relevancia la ubicación en el territorio, el estado de desarrollo del ecosistema, la especie dominante, edad, densidad, calidad del sitio (interacción suelo-clima-vegetación), tratamientos silvícolas utilizados, entre otras variables de interés.

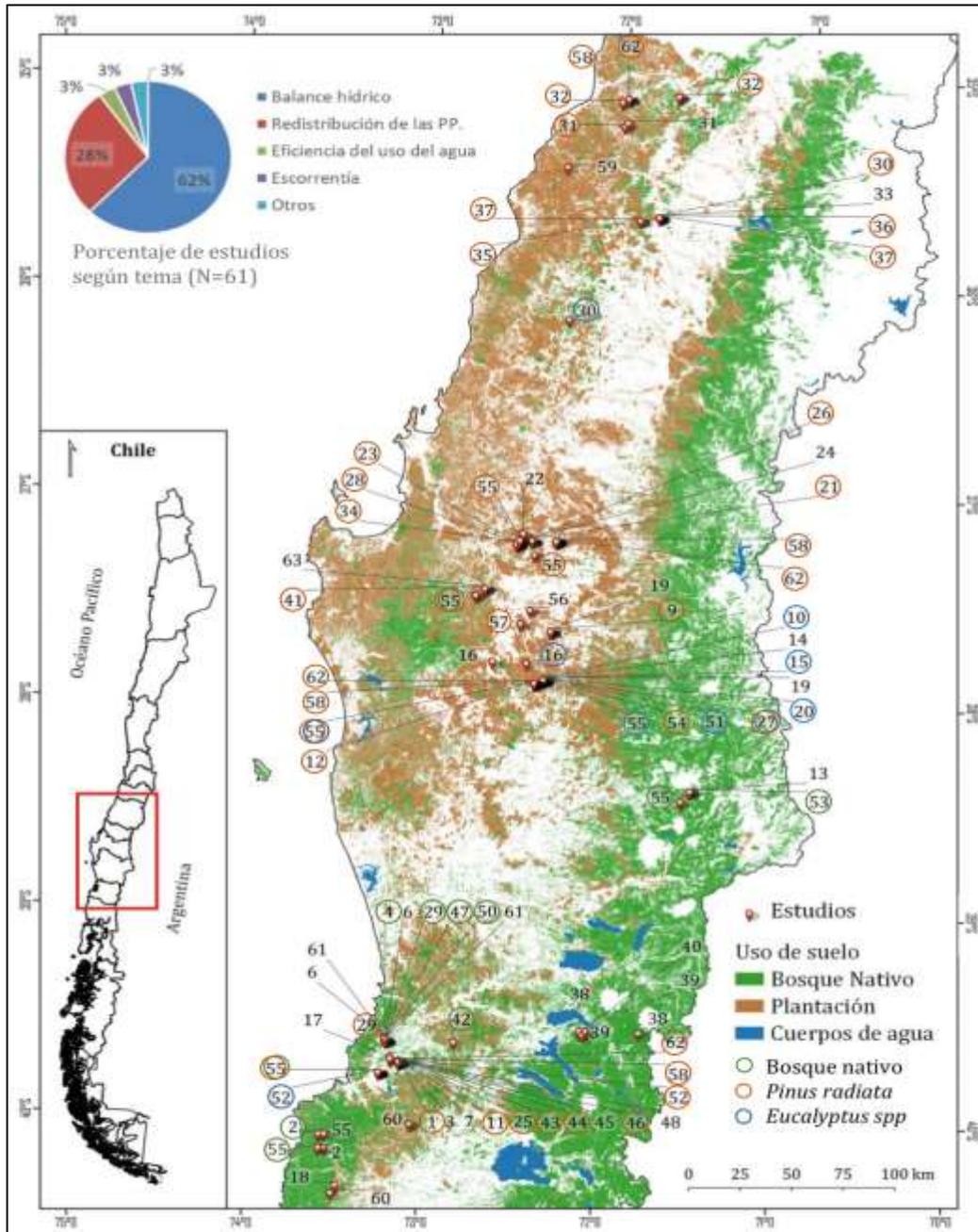


Figura 1. Investigación sobre balance hídrico a escala de parcela experimentales en la zona centro-sur de Chile.

Del universo de estudios se sistematizó toda la información asociada al balance hídrico y se generó una base de datos con 13 hojas de cálculo que dan cuenta de las características de los estudios y los diferentes niveles de información, como es el caso de registros anuales de precipitación y caudales,

componentes de la redistribución de las precipitaciones en escalas estacionales y mensuales, la escorrentía y el contenido de humedad del suelo, entre otros³. Por su relevancia, esta revisión analiza los valores de Precipitación total (Pt), Precipitación directa (Pd) e Intercepción de copas (Ic) de 195 pares de datos agregado a escala anual (año hidrológico) para diferentes ecosistemas forestales, los cuales son presentados en el Cuadro 1. Para un mejor entendimiento de la información se presenta la Figura 2.

Cuadro 1. Identificación de trabajos de balance hídrico a escala de parcelas para diversos ecosistemas boscosos en Chile.

	Pares de datos revisados	Rango latitudinal de los estudios (°lat S)	Rango de edades (años)	Rango de densidad (N/ha)	Identificación de los estudios (ID*)
Plantaciones <i>P. radiata</i>	140	35,1 – 40,0	4 – 26	105– 2.000	1; 9; 11; 12; 21; 23; 25; 26; 27; 28; 29;30; 31; 32; 34; 35; 36; 37; 41; 43; 44; 46; 52; 54; 55; 57; 58; 62
Plantaciones <i>Eucalyptus spp.</i>	27	36,1 -37,9	2 – 9	633 – 1.560	10; 30; 15; 16; 20; 27; 51; 52; 55
Bosques nativos	28	37,5 - 40,1	25 – 600	3.500 – 335	2; 4; 29; 42; 47; 50; 53; 55

* corresponde a ID presentado en Figura 1, cuyo detalle cuantitativo se presenta en la base de datos del material anexo¹.

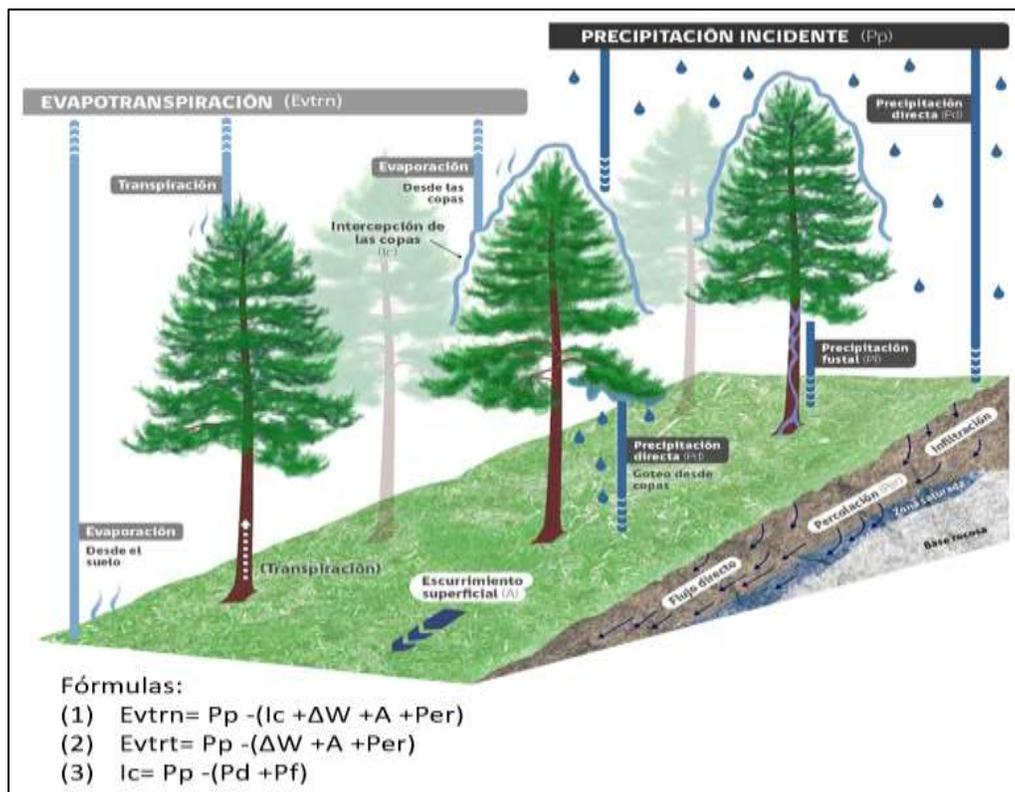


Figura 2. Esquema de transformación del agua al tomar contacto la precipitación con la cubierta boscosa. Evapotranspiración neta (Evtrn), Evapotranspiración total (Evtrt), Intercepción de Copas (Ic), Precipitación incidente o total (Pp), Contenido de humedad del suelo (ΔW), Escurrimiento superficial (A), Percolación (Per), Precipitación directa (Pd), Precipitación fustal (Pf).

³ La base de datos con la información mencionada se puede bajar desde el sitio web de Ciencia e Investigación Forestal, usando el DOI de este documento.

El análisis de los datos muestra una relación directa entre los montos absolutos (mm) de Precipitación Total (Pt), Precipitación Directa (Pd) e Intercepción de Copas (Ic) en función del gradiente latitudinal y longitudinal, relación que se invierte para los montos relativos (%) de esta última variable (Ic) (Figura 3). La tendencia observada responde a las características climáticas del territorio, donde se incrementa la precipitación total a medida que aumenta la latitud (de norte a sur), con variaciones locales en longitud (de oriente a poniente).

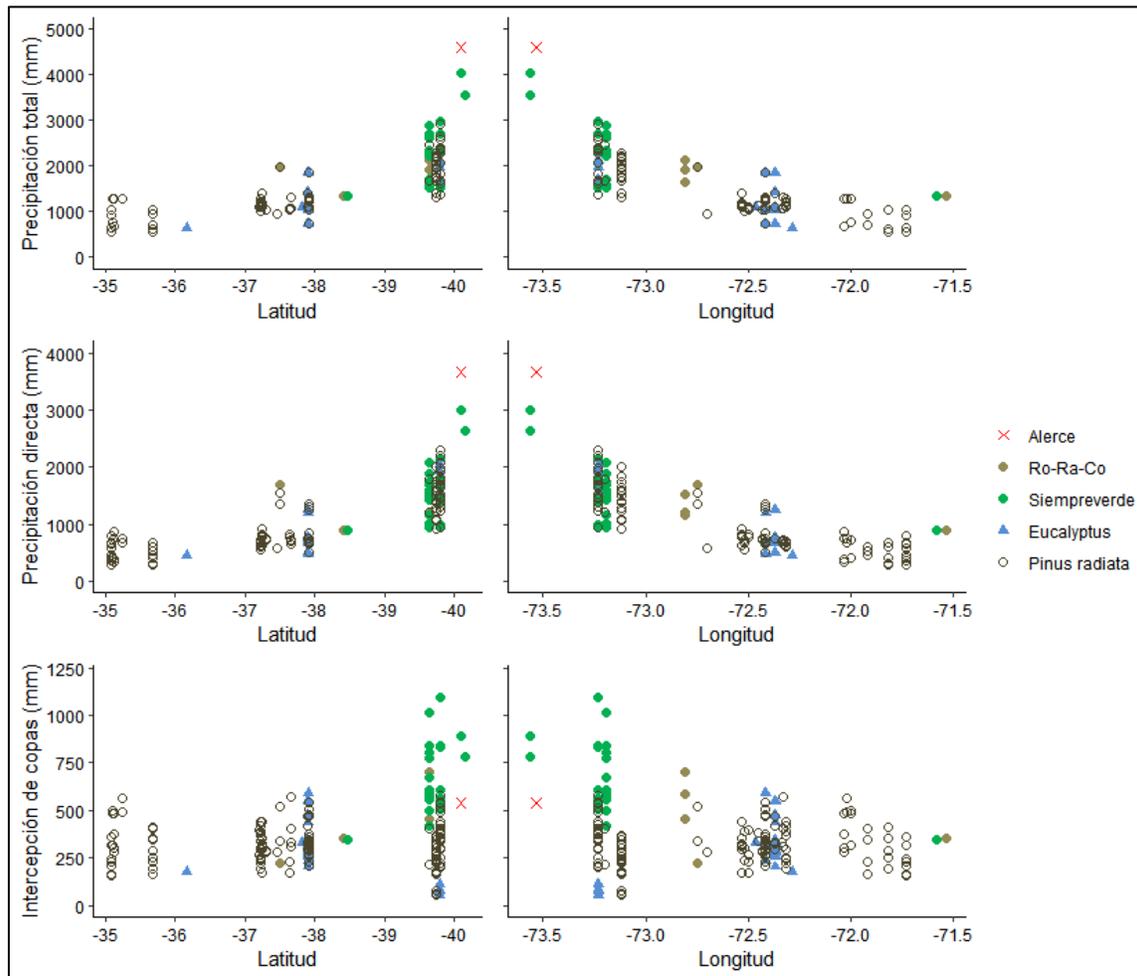


Figura 3. Precipitación total (pt), directa (Pd) e intercepción de copas (Ic) para distintos ecosistemas en el gradiente latitudinal y longitudinal.

En el gradiente latitudinal es posible observar algunas diferencias entre la zona norte (35°-37° S, referencia aproximada: Curicó-Coronel), centro (37° - 39° S, referencia aproximada: Coronel-Pitrufuén) y sur (39° - 40,5° S, referencia aproximada: Pitrufuén-Osorno), donde las precipitaciones promedio registradas fueron de 873, 1.154 y 1.835 milímetros, respectivamente. En este gradiente, la tasa más alta de Ic se observa en la zona norte con valores entre un 22 - 46% de la precipitación total, mientras que en la zona centro y sur los valores varían en rangos entre un 11 - 50% y 3 - 37%, respetivamente (Figura 3). Esta tendencia es coincidente con el gradiente de precipitaciones asociado al cambio latitudinal, con una relación positiva entre los montos absolutos de la Precipitación Total (Pt) y la Precipitación Directa (Pd), Precipitación Neta (Pn) (datos no mostrados) e Intercepción de Copas (Ic) (Figura 4).

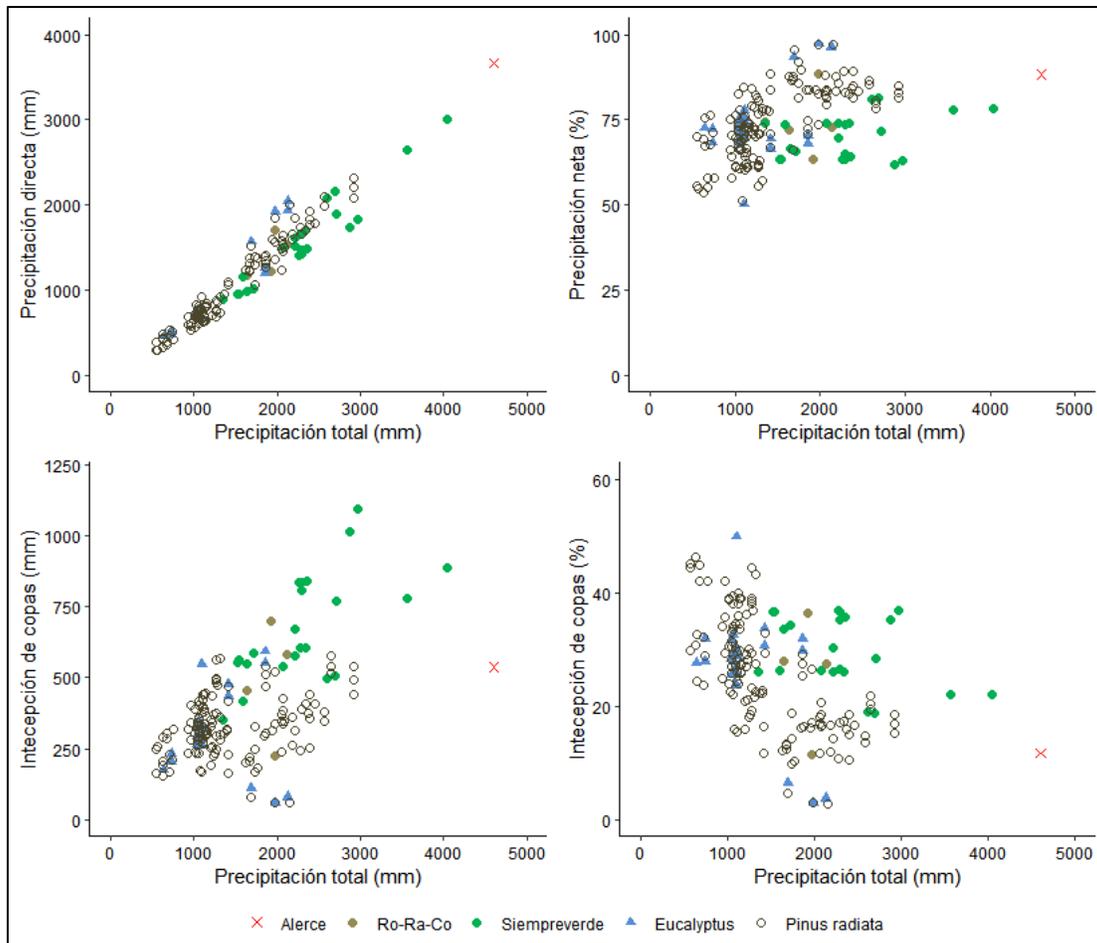


Figura 4. Relación de valores absolutos (mm) y relativos (%) de las precipitación directa e interceccción de copas en función de la precipitación total para diferentes ecosistemas boscosos.

Para el caso de los boques nativos se observa que la I_c varía entre 20 y 40%, siendo valores superiores a los encontrados para las plantaciones adultas en similar condición de pluviometría. Ello advierte diferencias entre la estructura de los ecosistemas, donde para el caso de bosques nativos tienen varios estratos en la cobertura de copas y un sotobosque que incrementa la tasa de interceccción de lluvia. En el caso de las plantaciones, la dispersión de los valores demuestra la importancia de las características particulares de estos ecosistemas, donde factores como la edad y densidad, parecieran jugar un rol en los montos relativos de la P_d e I_c , sin embargo, como generalmente ocurre en el estudio de sistemas abiertos, las relaciones no son del todo concluyentes (Figura 5).

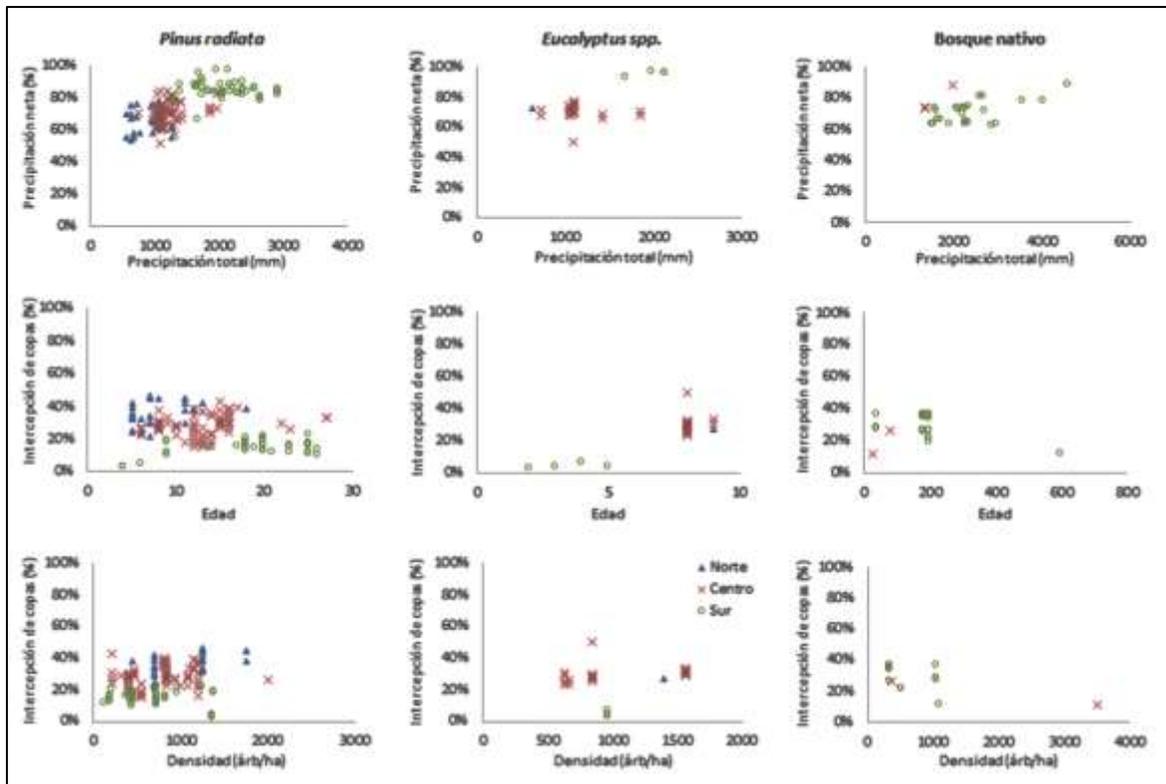


Figura 5. Valores relativos de precipitación neta en función de la precipitación total en intercepción de copas en función de la edad y densidad para plantaciones de *P. radiata*, *Eucalyptus spp.* y bosques nativos en zona norte (arriba), zona centro (al centro) y zona sur (abajo).

Considerando la variabilidad de los resultados observados, es posible inferir que el estado de desarrollo (edad) y la densidad de los ecosistemas boscosos, afectan los componentes de la redistribución de las precipitaciones, sin embargo, estas variables adquieren mayor o menor importancia dependiendo de la ubicación geográfica en se encuentran estos ecosistemas. Un modelo de regresión múltiple explica los montos relativos y absolutos de la Pn e Ic en plantaciones de *Pinus radiata* y muestra esta relación de dependencia, con diferentes niveles de significancia para las distintas zonas de crecimiento (Cuadro 2).

Cuadro 2. Relación entre el monto relativo de la Intercepción de Copas y estructura de plantaciones de *Pinus radiata* y precipitación incidente en la zona norte, centro y sur.

	Zona	Densidad (N/ha)	Edad (años)	Pp total (mm)	R ² adj	F	Df	P
Pn (mm)	Norte	-0,63**	-0,55*	0,97**	0,93	117,21	3,22	<0,0001
	Centro	-0,14	0,27*	0,93**	0,87	152,25	3,63	<0,0001
	Sur	--	0,43*	0,96**	0,92	250,40	2,37	<0,0001
Pn (%)	Norte	-0,62*	-0,48*	0,31	0,43	7,52	3,22	0,0012
	Centro	0,15	0,27*	0,28*	0,11	3,62	3,63	0,0176
	Sur	--	0,42	--	0,15	7,94	1,38	<0,0001
Ic (mm)	Norte	0,63**	0,55*	0,86**	0,84	45,44	3,22	<0,0001
	Centro	0,15*	0,23*	0,49**	0,29	10,22	3,63	<0,0001
	Sur	--	0,47*	0,77**	0,62	32,80	2,37	<0,0001
Ic (%)	Norte	0,62*	0,56*	-0,31	0,44	7,53	3,22	0,0012
	Centro	0,19	0,28*	-0,26*	0,11	3,89	3,63	0,0100
	Sur	--	0,47*	0,31	0,24	7,38	2,37	0,0020

*p<0,005, **p<0,001 para coeficientes de correlación parcial.

Producción de Madera y su Relación con el Agua

En Chile existen dos tipos de ecosistemas forestales contrastantes respecto a los objetivos de manejo y valoración social. Por un lado, a escala mundial los bosques nativos son considerados como de gran importancia dado el alto grado de endemismo y biodiversidad (Olson & Dinerstein, 1998) y por el otro, las plantaciones forestales de rápido crecimiento –principalmente *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp*- son altamente valoradas para satisfacer la creciente demanda de fibra y madera para fines industriales (INFOR 2020; Büchner *et al.*, 2018). A escala nacional, los bosques nativos, destinados principalmente a la producción de leña y biomasa para la alimentación de animales de crianza, sobrepasando en muchos casos los niveles de productividad de estos ecosistemas (Reyes *et al.*, 2018), constituyen acciones de degradación que carecen de un cuestionamiento social (Vergara *et al.*, 2019). Por su parte, las plantaciones de rápido crecimiento son cuestionadas por el conjunto de las externalidades propias de una silvicultura intensiva que maximiza la producción de madera en cortos períodos de tiempo, por ejemplo, el caso del efecto sobre la calidad y cantidad de agua que drena desde las pequeñas cuencas hidrográficas (Little *et al.*, 2014).

Comprender los mecanismos que regulan el ciclo hidrológico en los ecosistemas forestales, especialmente en los suelos de aptitud preferentemente forestal destinados a la provisión conjunta de madera y agua, es de suma importancia para planificar el uso de la tierra en el mediano y largo plazo. Por lo tanto, en el contexto del incremento conjunto y sostenido de la demanda por madera y agua a distintas escalas, el desafío es encontrar las alternativas de manejo que maximicen dichas alternativas de uso de los territorios, considerando para ello el efecto que provocan los ecosistemas forestales en el balance hídrico. En otras palabras, al utilizar el agua retenida en el suelo para generar biomasa (madera), los árboles devuelven parte de la precipitación a la atmósfera por la intercepción de ésta en las copas, cambiando el balance hídrico, por ejemplo, a escala de árbol, rodal o cuencas.

Según la información presentada, la variabilidad de la precipitación que alcanza a llegar al suelo o, por el contrario, la intercepción de la lluvia en las copas de los árboles, dependen del tipo de ecosistema boscoso, su manejo y la ubicación en el territorio. Lo anterior indica que una misma especie puede utilizar el agua para producir madera a tasas muy diferentes, con efectos directos en la cantidad de agua que queda disponible para la recarga de la napa freática y los cursos de agua. A modo de ejemplo, utilizando la información disponible para plantaciones de *P. radiata*, se observa que la demanda total de agua para producir madera varía en función de la latitud. En la zona norte la demanda total de agua para producir madera supera el 80% de la precipitación total, llegando incluso a valores cercanos al 98%. Para latitudes medias, los valores tienen un rango aproximado entre 60 y 80%, donde la edad de las plantaciones pareciera tener un efecto en este monto. Los valores más bajos son aquellos encontrados en latitudes altas, con valores que no superan el 50% de la Precipitación Total (Figura 6). Por lo tanto, la ubicación de los ecosistemas forestales en el territorio presenta una variabilidad que acompaña la eficiencia que tienen las especies en el uso del agua para producir madera y también la cantidad de agua que queda disponible para el funcionamiento y conservación de los otros ecosistemas, así como otros usos del agua.

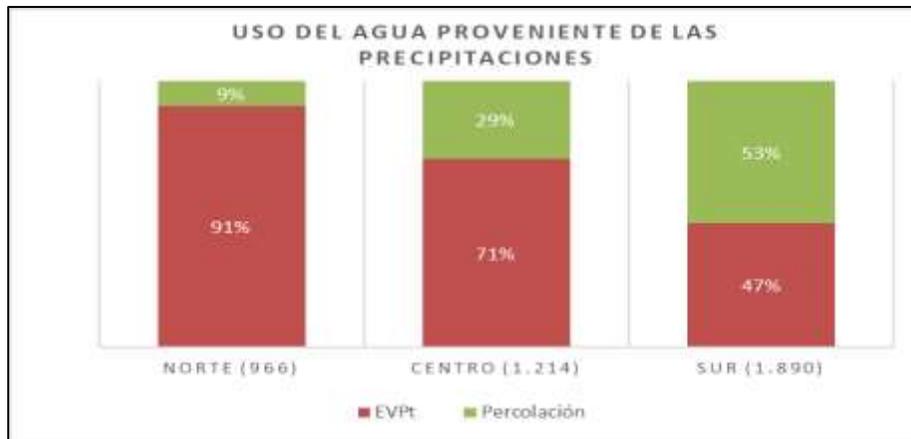
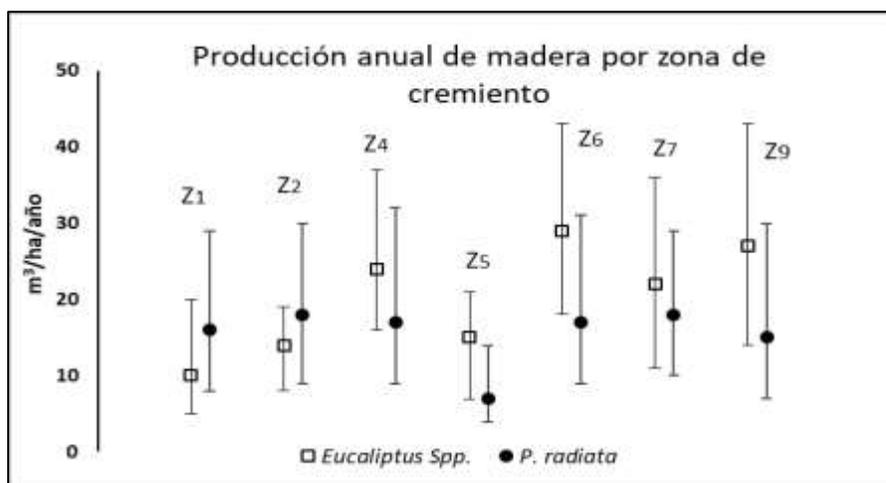


Figura 6. Uso del agua (EVPt evapotranspiración total) proveniente de las precipitaciones en *P. radiata* y percolación (agua disponible para la recarga de la napa freática, acuíferos, cuerpos de agua, conservación y funcionamiento de ecosistemas y otros usos antrópicos del agua).

Según la información presentada en el Cuadro 2, la eficiencia en el uso del agua, entendida como la cantidad de agua necesaria para producir un metro cúbico de madera (m^3 agua/ m^3 madera), estaría fuertemente explicada por el efecto de la edad y densidad de la plantación, además de por variables ambientales, como la temperatura del período estival y las características del suelo. Si bien esta aproximación considera que la producción anual de madera está asociada a la demanda total de agua, entendida como el agua interceptada por las copas de los árboles y la que se consume por fotosíntesis (Evapotranspiración total) (Huber & Trecaman, 2004), también estaría determinada por la productividad de los sitios (clima y suelo) en que se desarrollan los ecosistemas boscosos.

Respecto a las tasas de incremento medio anual en volumen de madera, para plantaciones de *P. radiata* y *Eucalyptus spp.* con distinto manejo (Büchner *et al.*, 2018), se observan valores que resultan determinantes para analizar la eficiencia del uso de agua en relación al manejo, la zona de crecimiento y la calidad de sitio. Estos montos dan cuenta que, para una misma especie como por ejemplo *P. radiata*, en una misma zona de crecimiento el rendimiento puede duplicarse, y si comparamos rendimientos entre especies y zonas de crecimientos, las diferencias pueden ser de hasta $40 m^3/ha/año$ (Figura 7).



(Fuente: Büchner *et al.*, 2018)

Figura 7. Valores de productividad ($m^3/ha/año$) promedio, máximo y mínimo para *P. radiata* y *Eucalyptus spp.*, según zonas de crecimiento y esquemas de manejo. Información a partir Büchner *et al.* (2018), Figura 11 y Cuadro 18.

Información disponible respecto de la productividad en rodales de *P. radiata* con edades de 4 a 23 años y densidades entre 124 y 1.750 árboles por hectárea, indican valores promedios de 10, 20 y 22 m³/ha/año en la zona norte, centro y sur, respectivamente. En estos rodales se estima un consumo total de agua de 872, 854 y 850 milímetros anuales, lo que equivale a 10 veces más en términos de metros cúbicos de agua por hectárea utilizados para producir madera. Por lo tanto, la eficiencia en el uso del agua fluctuaría entre 870, 427 y 386 m³ agua / m³ madera, (Figura 6). Huber & Trecaman (2004), estiman valores de eficiencia de 373 y 1.287 (m³/m³), rangos que estaría fuertemente explicados, además de las variables ambientales como la temperatura del período estival y las características del suelo, por el efecto del raleo que disminuye el número de árboles por hectárea (Huber & Trecaman, 2004).

Aun cuando el análisis anterior entrega una aproximación de la eficiencia en el uso del agua para producir madera, éste no considera la compleja interrelación en organización del ecosistema a distintas escalas (árbol, rodal y cuenca), la cual aún es poco entendida. Sin embargo, esta aproximación podría ser de utilidad para definir zonas donde es más eficiente producir madera por unidad de agua utilizada (m³/m³), así también, implementar esquemas de manejo que maximicen la productividad del sitio.

En otras palabras, aquellas zonas donde el agua proveniente de las precipitaciones es suficiente para satisfacer todos los usos del agua (madera, consumo humano, etc.), es importante realizar un manejo que permita maximizar los niveles de producción de madera, como por ejemplo las plantaciones de pequeños propietarios, las cuales tienen rendimientos muy inferiores (entre 110 a 200%) respecto a las establecidas por la gran industria (INFOR, 2015). Sin embargo, si la gestión del agua es el objetivo principal en el territorio, a expensas de una menor producción de biomasa que la que podría lograrse utilizando especies exóticas, puede ser necesario un equilibrio con árboles de crecimiento más lento, que consumen menos agua, siendo las especies nativas a menudo las más adecuadas (FAO *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La interacción entre los ecosistemas forestales y el agua resulta ser un proceso complejo que incluye todos los aspectos relacionados con el ciclo hidrológico, la estructura y cambios en las formaciones vegetacionales, las propiedades del suelo y las modificaciones que realiza el ser humano sobre dichos componentes de la naturaleza. Estudios de balance hídrico realizados en plantaciones forestales y bosques nativos permiten conocer cuantitativamente las transformaciones del agua cuando estas toman contacto con la masa boscosa, lo cual resulta determinante para entender la interacción como resultado de las características de los ecosistemas en un contexto territorial.

Acorde a la escala espacial y temporal estudiada, los trabajos realizados en Chile muestran resultados concluyentes respecto a las particularidades de las plantaciones forestales, los bosques nativos y el agua. Sin embargo, existe una simplificación de lo que actualmente se entiende por plantaciones o bosques nativos, que no considera la diversidad de situaciones posibles de encontrar en los territorios (especies, edades, densidades, estructuras, etc.). La información presentada en este trabajo respalda dicha variabilidad, de tal manera que realizar comparaciones entre ambos tipos de ecosistemas en base a una conceptualización genérica, pareciera carecer de un sentido lógico. Por el contrario, desprenderse de las comparaciones y entender dicha heterogeneidad, representa una oportunidad para avanzar en los nuevos desafíos de investigación aplicada, incluyendo la necesidad de ampliar los estudios existentes.

Dado el incremento sostenido de la demanda, tanto de madera para abastecer los mercados nacionales e internacionales y el agua para diversos usos, el desafío es generar nuevas propuestas de manejo que tengan un impacto positivo en términos del balance hídrico. Por lo tanto, una discusión sobre esta materia debiera centrarse en cómo utilizar estos ecosistemas en el marco de los objetivos de desarrollo del país o los territorios. Es decir, en áreas de vocación forestal destinadas a la producción de madera, incrementar la producción con el menor impacto en el recurso hídrico, o en suelos de aptitud forestal y sin vegetación arbórea proteger el suelo con plantaciones establecidas con este objetivo donde se manejen con rotaciones largas, talas rasas de menor tamaño o sistemas silvícolas de cubierta permanente.

Finalmente, en áreas con bosques nativos es importante identificar aquellas superficies con prioridades de restauración, con el objetivo de incrementar su biodiversidad y oferta de bienes y servicios ecosistémicos, incluyendo la provisión de agua en calidad y cantidad.

Actualmente se reconoce que la gestión y administración de los ecosistemas forestales debe evolucionar, tanto en las regulaciones jurídicas que deba implementar el Estado, como en la voluntad de los privados para adecuarse a los cambios que permitan enfrentar los nuevos desafíos derivados del cambio climático y global. Ello incluye los planes y propuestas de ordenamiento territorial o de cuencas, donde la restauración a escala de paisaje y utilización de nuevos instrumentos de fomento son objetivos estratégicos planteados en el marco de la Política Forestal en Chile (Documento de Política Forestal 2015-2035).

En relación a los ecosistemas forestales y el agua, se plantean las siguientes recomendaciones o actividades a implementar en el trabajo colectivo de los próximos años:

- Incorporar en los estudios de balance hídrico la integración de las escalas espaciales, enfatizando en unidades homogéneas de vegetación, de cuencas y paisajes.
- Profundizar en el análisis de escalas temporales acotadas, como por ejemplo las diferencias estacionales con énfasis en los meses de menor aporte de precipitaciones.
- Analizar el aporte de investigación desarrollada a escala de cuencas, considerando la variabilidad climática, la expresión territorial, la escala espacial y la temporalidad de los flujos estacionales.
- Incorporar ecosistemas poco estudiados tomando en cuenta los gradientes climáticos.
- Incorporar en los estudios hidrológicos la perspectiva social del recurso, incluyendo programas de monitoreo participativo, como la gestión entre diferentes actores de las cuencas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el programa de trabajo INFOR “Monitoreo de cuencas y otros ecosistemas forestales” año 2021-COD:3041331211, inserto en la Línea de Investigación Ecosistemas Forestales y Agua, financiado por MINAGRI. Por la información sobre productividad en plantaciones forestales se agradece también al programa de trabajo INFOR “Monitoreo y Análisis de la oferta de madera” Año 2021-COD: 3041131211 de la Línea de Investigación Inventario Forestal Continuo.

REFERENCIAS

- Abrahamson, D., Dougherty, P., & Zarnoch, S. (1998). Hydrological components of a young loblolly pine plantation on a sandy soil with estimates of water use and loss. *Water Resources Research*, 34(12): 3503-3513. <https://doi.org/10.1029/98WR02363>
- Álvarez-Garretón, C., Lara, A., Boisier, J.P. & Galleguillos, M. (2019). The Impacts of Native Forests and Forest Plantations on Water Supply in Chile. *Forests* 10(6): 473. <https://doi.org/10.3390/f10060473>.
- Büchner, C., Martín, M., Sagardía, R., Ávila, A., Molina, E., Rojas, Y., Muñoz, J. *et al.* (2018). Disponibilidad de Madera de Plantaciones de *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* 2017 - 2047. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 220. 123 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/28294>.
- Calder I. 1992. Hydrologic effects of land-use change. In: Maidment, D.R. (Ed). *Handbook of Hydrology*. New York, USA. McGraw-Hill. Pp: 13.1-13.5.
- CONAF, CONAMA, Banco Mundial, Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile & Universidad Católica de Temuco. (1999). *Catastro nacional de la vegetación nativa*. Santiago.
- Consejo de Política Forestal. (2015). *Política Forestal Chilena 2015-2035*. CONAF-MINAGRI. Santiago, 71 p.
- Cubbage, F., Mac Donagh, P., Sawinski, J., Rubilar, R., Donoso, P., Ferreira, A., Hoefflich, V. *et al.* (2007). Timber investment return for selected plantations and native forest in South America and the southern United States. *New Forests*, 33. Pp: 237–255. <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9025-4>
- Donoso, C. (1981). *Ecología Forestal. El bosque y su medioambiente*. Editorial Universitaria. Santiago.

- FAO, IUFRO & USDA. (2021). A guide to forest-water management. FAO Forestry Paper No. 185. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb6473en>
- Frêne, C., Dörner, J., Zúñiga, F. Cuevas, J., Alfaro, F. & Armesto, J. (2020). Eco-hydrological Functions in Forested Catchments of Southern Chile. *Ecosystems*, 23. Pp: 307–323. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00404-7>.
- Gajardo, R. (1994). La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria Santiago.
- Huber, A., Iroumé, A. & Bathurst, J. (2008). Effect of *Pinus radiata* plantation on water balance in Chile. *Hydrological Processes*. (22) 142-148.
- Huber A. & García, G. (1999). Importancia de los factores meteorológicos en la transpiración potencial de *Pinus radiata*. *Pyton*, 65. Pp: 143-152.
- Huber, J.A. & Trecaman, V.R. (2004). Eficiencia del uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque*, 25(3): 33-43. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002004000300004>.
- INFOR. (2015). Propuesta de acciones para minimizar las brechas en el manejo de plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios. Informe Técnico Final. 285 p.
- INFOR. (2018). Los Recursos Forestales de Chile 2017. En: <https://ifn.infor.cl/>. Instituto Forestal, Chile
- INFOR. (2020). Anuario Forestal 2020. Instituto Forestal, Chile. Boletín Estadístico N°174. 256 p.
- Iroumé, A. & Palacios, H. (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology*, 505. Pp: 113-125. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.031>
- Iroumé, A., Palacios, H., Bathurst, J. & Huber, A. (2010). Escorrentías y caudales máximos luego de la cosecha a tala rasa y del establecimiento de una nueva plantación en una cuenca experimental del sur de Chile. *Bosque*, 31(2): 117-128. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000200005>
- Iroumé, A., Mayen, O. & Huber, A. (2006). Runoff and peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile. *Hydrological Processes*, 20. Pp: 37-50. <https://doi.org/10.1002/hyp.5897>
- Jones, J., Almeida, A., Cisneros, F., Iroumé, A., Jobbagy, E., Lara, A., Paula de Lima, W. et al. (2016). Forests and water in South America. *Hydrological Processes*, 31(5): 972-980. <https://doi.org/10.1002/hyp.11035>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.011>
- Little, C., Cuevas, J., Lara, A., Pino, M. & Schoenholtz, S. (2014). Buffer effects of streamside native forests on water provision in watersheds dominated by exotic forest plantations. *Ecology*, 8(7): 1205-1217. <https://doi.org/10.1002/eco.1575>
- Little, C. & Lara, A. (2010). Ecological restoration for water yield increase as an ecosystem service in forested watersheds of south-central Chile. *Bosque*, 31(3): 175–178. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000300001>.
- Luebert, F. & Plischoff, P. (2004). Clasificación de pisos de vegetación y análisis de representatividad ecológica para áreas propuestas para protección de la ecorregión. Valdivia: Serie de Publicaciones WWF programa Ecorregión Valdiviana.
- Olson, D. & Dinerstein, E. (1998). The Global 200: a representation approach to conserving the earth's most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology*, 12. Pp: 502–515. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1998.012003502.x>
- Oyarzun, C.E., Aracena, C., Rutherford, P., Godoy, R. & Deschrijver, A. (2007). Effects of land use conversion from native forests to exotic plantations on nitrogen and phosphorus retention in catchments of southern Chile. *Water, Air & Soil Poll*, 179. Pp: 341-350. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9237-4>.
- Reyes, R., Nelson, H. & Zerriffi, H. (2018). Firewood: Cause or consequence? Underlying drivers of firewood production in the South of Chile. *Energy for Sustainable Development*. (42) 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.10.006>.
- Soto-Schönherr, S. & Iroumé, A. (2016). How much water do Chilean forests use? A review of interception losses in forest plot studies. *Hydrological Processes*, 30. Pp: 4674-4686. <https://doi.org/10.1002/hyp.10946>

Vergara, G., Schlegel, B., Little, C., Mujica, R. & Martin, M. (2019). ¿Degradación o Degradado? Necesidad de una Propuesta Conceptual para Recuperar la Funcionalidad y Capacidad Productiva de los Bosques. *Ciencia & Investigación Forestal*, 25(1): 69-79. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.511>