

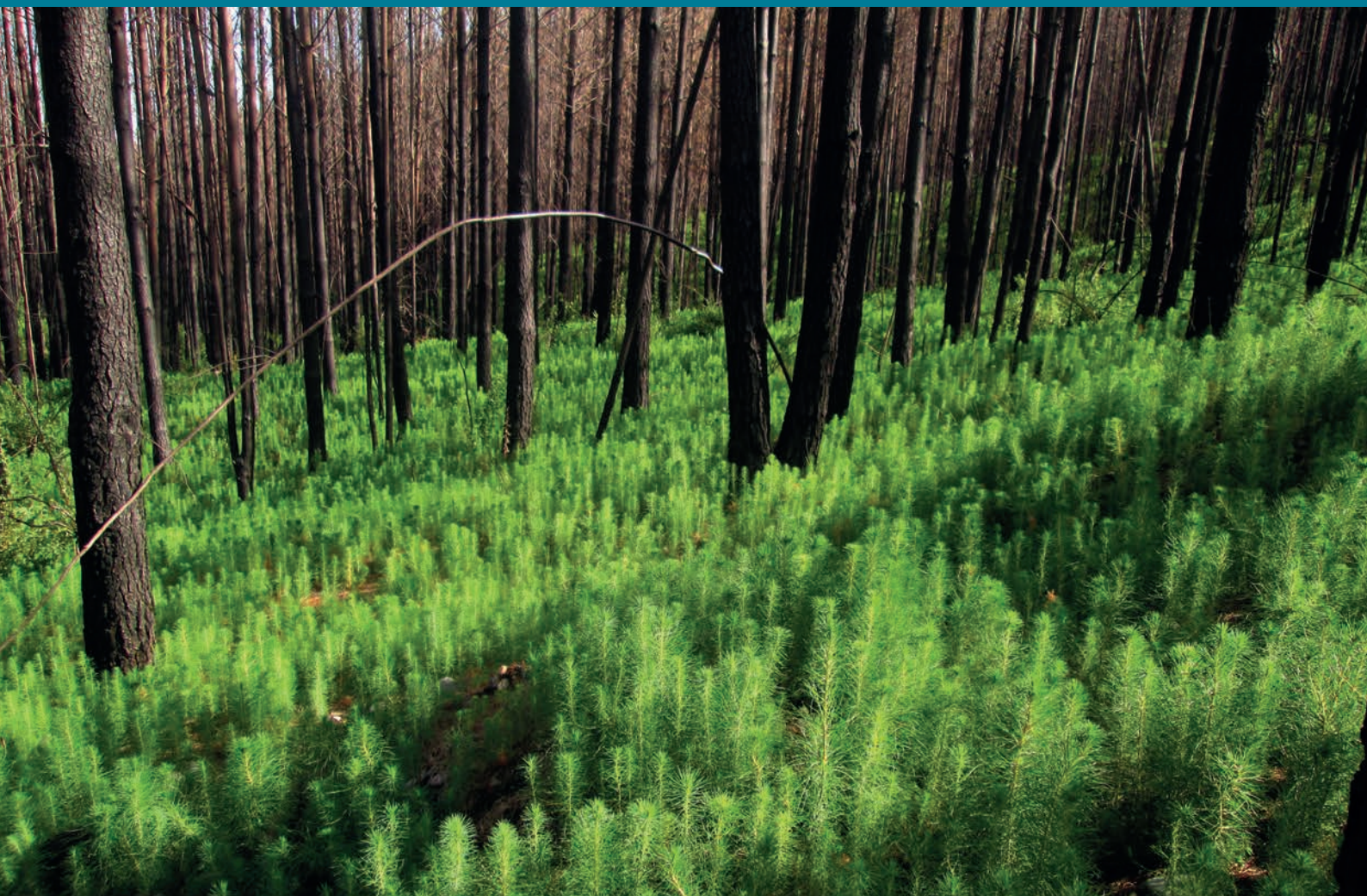


Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa
Hidrológico
Internacional

Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile



ANTECEDENTES DE LA RELACIÓN MASA FORESTAL Y DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN CHILE

Autores Universidad de Talca

Dr. Roberto Pizarro

Dra. Claudia Sangüesa

Ing. Carlos Vallejos

Ing. Romina Mendoza

Ing. Juan Pino

Ing. Ángel Berríos

Ing. Alfredo Ibáñez

Ing. Bárbara Castillo

Ing. Alejandra Bernal

Autor Universidad de Chile

Dr. Pablo García

Autor Universidad de Concepción

Dr. José Luis Arumi

Autor Universidad Austral de Chile

Dr. Andrés Iroumé

Autor Universidad de Arizona

Dr. Rodrigo Valdés-Pineda

Publicado en 2019 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, Francia y la Oficina de la UNESCO en Montevideo, Luis Piera 1992, Edificio Mercosur, 2do piso, Montevideo 11200, Uruguay.

© UNESCO 2019



Esta publicación está disponible en acceso abierto bajo la licencia Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>). Al utilizar el contenido de la presente publicación, los usuarios aceptan las condiciones de utilización del Repositorio UNESCO de acceso abierto (www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-sp).

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen no implican toma alguna de posición de parte de la UNESCO en cuanto al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o regiones ni respecto de sus autoridades, fronteras o límites.

Las ideas y opiniones expresadas en esta obra son las de los autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de la UNESCO ni comprometen a la Organización.

Editor de la Serie Técnica del PHI-LAC: Miguel de França Doria

Fotografía de cubierta: Christian Valdés

Diseño gráfico: Ser Gráficos

Diseño de cubierta: Ser Gráficos

Ilustraciones: Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, Universidad de Talca.

Imprenta: Impresora Contacto

Editor de la Serie Técnica: Miguel de França Doria

Asistente de edición: María Clara Cremona

Prólogo

“Volví a mi tierra verde y ya no estaba, ya no estaba la tierra, se había ido”... fueron las palabras que dedicó el gran poeta chileno Don Pablo Neruda en su Oda a la erosión en la provincia del Malleco. Dicha provincia está ubicada al sur de Chile, lugar en que alguna vez abundaron las precipitaciones y con ello los paisajes verdes. Sin embargo, el premio Nobel hace más de 50 años ya veía cómo los paisajes y las tierras iban tornándose cada vez más secos, cambiando del color verde a un color café árido. En la actualidad, gracias a políticas públicas visionarias y a un sentido cada vez más ambientalista de la población, se ha ido generando una restauración hidrológico-forestal de paisajes chilenos desertificados en la antigüedad. Así, es posible advertir vastas extensiones forestadas con plantaciones exóticas, pero también es posible visualizar la recuperación y el fortalecimiento de diversas áreas ocupadas por el bosque nativo al cual cantaba el poeta Neruda.

Por otro lado, la presión que existe hoy sobre los recursos hídricos en Chile, ha determinado que en diversas zonas se produzcan conflictos por el agua, dado que existen demandas mayores a las ofertas disponibles. Si a este escenario económico y social se agrega un segundo contexto relacionado con la variabilidad y el cambio climático, que se presenta en diversas escalas temporales y espaciales, se configura un escenario de mayor preocupación política, social y ambiental. Este hecho demanda que los científicos y técnicos entreguen respuestas concretas y basadas en evidencia empírica, que permitan dar a luz políticas públicas coherentes en lo social, productivas en lo económico y sustentables en lo ambiental.

En el contexto descrito, el rol de las masas forestales tiende a ser altamente cuestionado en diversos países, especialmente si se trata de plantaciones exóticas y ello porque se les relaciona con una menor disponibilidad de agua para otros usos. Sin embargo, si se trata de un clima mediterráneo como la mayoría del clima de Chile, que presenta las lluvias concentradas en invierno, período durante el cual la vegetación entra en latencia, entonces solo cabría esperar que la masa forestal tendiera a generar obstáculos y retención al paso del agua, favoreciendo procesos de infiltración y de recarga de acuíferos. Si se trata de climas donde las precipitaciones abundan en el período estival, período en el cual la vegetación boscosa se encuentra en plena producción de biomasa, entonces debería esperarse una disminución de los caudales circulantes por el consumo que la vegetación hace del agua caída.

No obstante lo anterior, las dos situaciones planteadas se estructuran en base a otras variables que es necesario analizar y considerar, como son, por ejemplo, el monto e intensidad de la lluvia, el tipo de suelo, la orografía del lugar y la altitud, entre otras. Es decir, las relaciones precipitación-escorrentía-vegetación se estructuran en una ecuación compleja que es necesario identificar en sus reales variables y en sus dimensiones físicas.

En función de lo señalado, es para mí un placer como Directora Regional para América Latina y el Caribe de la oficina regional de Unesco de Ciencia y Tecnología, pero también debo decirlo, como Ingeniera Forestal, el prologar este libro que da cuenta de las investigaciones realizadas por diversos académicos de las Universidades de Talca, de Chile, de Concepción y Austral, todas de la República de Chile, libro en el cual mediante 14 preguntas y respuestas, en un lenguaje técnico, pero también amigable con el lector, dan cuenta de sus propios resultados y los relacionan con los de otros investigadores en diversas partes del mundo. Asimismo, este libro se inscribe en uno de los productos del Grupo de Trabajo de Hidrología de Sistemas Forestales, Grupo del Programa Hidrológico Internacional de la Unesco, que ha iniciado su trabajo muy fuertemente desde Chile, y al cual invitamos a integrarse a otros países de América Latina y el Caribe. Esto, porque las masas forestales no solo tienen un rol fundamental para la mitigación en el largo plazo de los efectos del cambio climático, sino también por el rol que pueden y deben cumplir en el ciclo hidrológico y en los efectos positivos que generan dichas masas, en términos de sustentabilidad de ecosistemas y producción de agua de las cuencas.

Finalmente, felicito muy sinceramente a los autores y espero que este libro sea un elemento de análisis y discusión al interior de la comunidad científica y de ingenieros, no solo en Chile, sino en América Latina y el Caribe.

Ing. Lidia Brito
Directora
Oficina Regional de Ciencias de la UNESCO
para América Latina y el Caribe

Índice

Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile central.....	7
I. Introducción.....	9
II. Preguntas	13
1. ¿De dónde obtienen el agua para su desarrollo las especies arbóreas ubicadas en climas mediterráneos como el que caracteriza a la zona centro sur de Chile?	13
2. ¿Qué es más eficiente desde el punto de vista hidrológico: mantener una ladera desprovista de vegetación o forestada con especies arbóreas?.....	14
3. ¿Es cierto que las plantaciones forestales succionan el agua desde las napas (aguas subterráneas), para su desarrollo?	17
4. ¿En qué período del año se produce el mayor consumo de agua por parte de las especies arbóreas?	18
5. Las plantaciones forestales y en general las masas forestales, ¿favorecen o no la recarga de los acuíferos, es decir, el aumento de la reserva de agua de las cuencas? ¿Son las plantaciones forestales las responsables de que se sequen los pozos, norias, esteros y ríos en verano?	19
6. ¿Cómo influyen las plantaciones forestales en la calidad de los recursos hídricos aguas abajo?	21
7. ¿Existen estudios que señalen que las plantaciones forestales son favorables para la mantención de agua en las cuencas hidrográficas de Chile?	22
8. Bajo los escenarios de cambio y variabilidad climática y del aumento de la demanda de agua; ¿es recomendable en la zona centro sur de Chile forestar terrenos desprovistos de vegetación?	24
9. ¿Existen diferencias en el consumo de agua entre una plantación forestal y una superficie equivalente de bosque nativo? ¿Es verdad que el bosque nativo produce agua y las plantaciones forestales la consumen?.....	25
10. ¿Cuáles serían los efectos de la remoción de la vegetación arbórea en la hidrología de una cuenca?	26
11. Las aguas que escurren superficialmente en los cursos de agua en el período estival, ¿proviene directamente de la lluvia caída en invierno?	27
12. ¿Recomendaría la forestación como método de recuperación de los equilibrios hidrológicos?	28
13. ¿Afecta el cambio climático a la disponibilidad de agua local?	30
14. ¿Se están aplicando medidas de resguardo de la calidad del agua de las comunidades y cuáles serían las experiencias que se podrían ilustrar?.....	31
III. Conclusiones	32
IV. Referencias bibliográficas.....	34

Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile central

Frente a la inquietud planteada por diversas personas e instituciones, ligadas a la Hidrología de Sistemas Forestales, se solicitó al Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca (CTHA), pronunciarse respecto a diversas preguntas en el contexto de las relaciones precipitación-escorrentía-vegetación. Para ello, especialistas del CTHA en conjunto con diversos expertos pertenecientes a la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile (CFCN), la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción y la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales de la Universidad Austral de Chile, elaboraron las respuestas a un conjunto de 14 preguntas. A partir de un trabajo mancomunado, fue posible dar respuesta a las preguntas planteadas, incluidas en el presente documento. A modo de introducción, se muestran algunos aspectos básicos de la relación entre el complejo suelo-vegetación y la hidrología o ciencia que estudia el movimiento del agua a través del ciclo hidrológico.

I. Introducción

Se espera que la presión sobre los recursos hídricos en el mundo se incremente significativamente en el futuro. Muchos están de acuerdo en que para el año 2025, 1.800 millones de personas vivirán en regiones con escasez absoluta de agua y dos tercios de la población mundial podrían experimentar condiciones de estrés hídrico (FAO, 2007). Asimismo, la humanidad está siendo testigo de crecientes problemas relacionados con eventos extremos, tales como las sequías y las inundaciones. La disponibilidad y calidad del agua en muchas regiones del mundo, están siendo cada vez más amenazadas debido a un uso excesivo del recurso, contaminación de los cuerpos de agua y los impactos negativos del cambio climático que se proyectan en distintas partes del globo.

En este sentido, Chile no es la excepción. Durante las últimas décadas, se ha verificado la presencia de fenómenos de cambio y variabilidad climática, lo que ha afectado la oferta hídrica en gran parte del país. De igual manera, se han incrementado significativamente las demandas por el recurso en los distintos sectores productivos. Esta alarmante situación ha dado origen a tensiones entre los diversos usuarios del agua, como son las empresas mineras, agrícolas y forestales, con las comunidades humanas, así como también hay tensiones entre los diversos sectores productivos.

En el contexto de las tensiones con el sector forestal, es preciso señalar previamente que los ecosistemas forestales desempeñan un papel crucial en el ciclo hidrológico, pues influyen en la cantidad y calidad de agua disponible y regulan los flujos de agua superficial y subterránea. Un desafío clave que enfrentan quienes manejan la tierra, los bosques, las plantaciones forestales y los recursos hídricos, es maximizar la amplia gama de beneficios de los ecosistemas forestales, sin menoscabo de los recursos hídricos y de sus funciones ecosistémicas. Este reto es particularmente relevante en el contexto de la adaptación al cambio climático, lo que refuerza cada vez más la importancia de la gestión sostenible del sector forestal. Así, existe una necesidad urgente de poseer una mejor comprensión sobre las interacciones entre dichos sistemas forestales y los recursos hídricos, con el fin de incorporar los resultados de las investigaciones en las políticas públicas.

La cantidad de agua utilizada por los árboles ha sido el foco de un sinnúmero de estudios en todo el mundo, proceso que comenzó hace más de un siglo (Bosch y Hewlett, 1982; McCulloch y Robinson, 1993). Los árboles consumen agua mediante dos procesos distintos. En primer lugar, el agua es absorbida por las raíces del árbol en el suelo, evaporándose a través de los poros o estomas en la superficie de las hojas. Este proceso es conocido como transpiración y es un proceso fisiológico que actúa en respuesta a factores edáficos y atmosféricos. El segundo proceso es la intercepción de agua por las superficies de las hojas, ramas y troncos durante los eventos de lluvia, y su posterior evaporación. Las pérdidas por intercepción se ven reforzadas por la elevada turbulencia atmosférica creada por las copas de los árboles en la zona de borde superior del bosque, debido a su altura y su rugoso perfil aerodinámico. Tomados en conjunto, estos dos procesos son denominados como evapotranspiración. Ambos se ven fuertemente afectados por la cantidad de luz solar, la temperatura y la humedad atmosférica, así como también por la velocidad del viento. De este modo, los árboles tienen la capacidad de utilizar más agua que la mayoría de los otros tipos de vegetación, aunque la cuestión de si lo hacen o no, y en qué medida, depende de varios factores, los que se listan a continuación (Jofré *et al.*, 2014).

- **Especie:** La distinción principal se encuentra entre coníferas y latifoliadas. Las coníferas siempreverdes, tienden a tener una mayor intercepción del agua lluvia que las latifoliadas, debido a que la superficie foliar en las coníferas tiende a ser mayor que la superficie foliar de las latifoliadas (Pook *et al.*, 1991; Fan *et al.*, 2014). Además, mantienen las hojas durante todo el año y en particular durante el período de invierno, cuando las condiciones son por lo general más húmedas. Sin embargo, en general las tasas de transpiración varían muy poco entre ambos sistemas forestales. Por lo tanto, si los procesos de intercepción y transpiración se consideran en conjunto, se podría decir que las coníferas utilizan algo más de agua en comparación a las latifoliadas, aunque siempre son proporciones bajas.

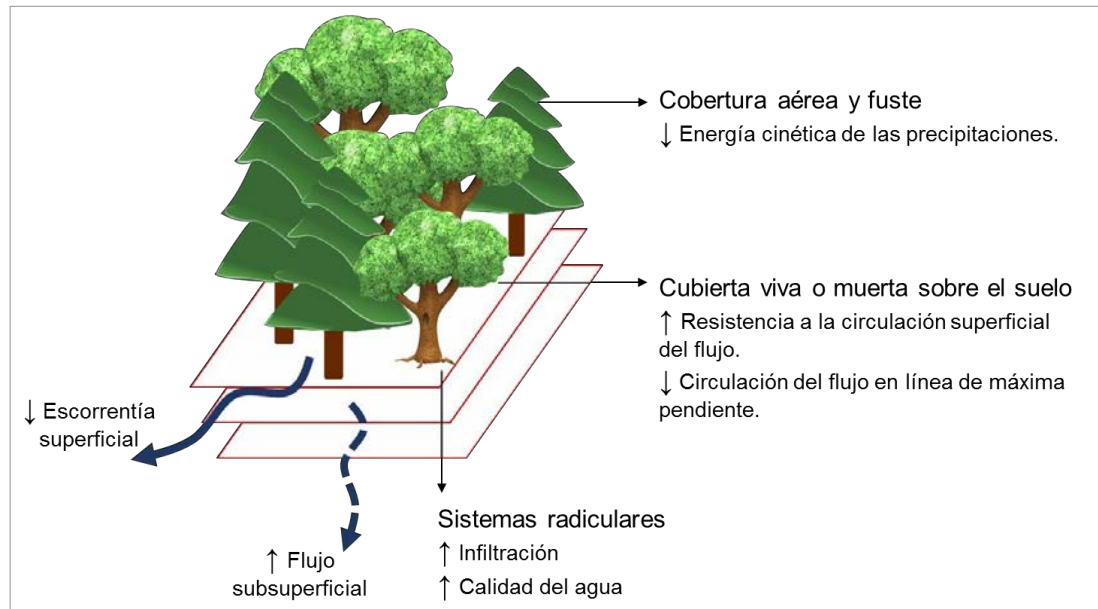
- **Clima y distribución de la plantación:** Pese a lo anterior, la cantidad de agua utilizada por las especies forestales está fuertemente influenciada por el clima en el que estas se encuentran. Las pérdidas anuales de interceptación, son afectadas de manera importante por el clima y, en términos de volumen absoluto, alcanzan un máximo en condiciones húmedas y ventosas. En general, se ha aprendido que los efectos hidrológicos de las plantaciones forestales son mínimos cuando se establecen en zonas más secas (<800mm/año), pues la evidencia internacional indica que los árboles utilizan más agua cuando el recurso se encuentra disponible en mayores cantidades (Maier *et al.*, 2017). Sin embargo y como se detallará más adelante en este documento, la realidad chilena en términos de la relación entre clima y consumo de agua, es muy distinta a la realidad internacional. Asimismo, la posición de las plantaciones dentro de la cuenca y el diseño de plantación puede influir fuertemente en la disponibilidad de agua para otros fines. Los estudios indican que los efectos se minimizan al plantar lejos de las quebradas y cursos de agua, es decir, en las zonas más altas de las cuencas, lejos de las napas. Adicionalmente, plantar en sentido de las curvas de nivel puede significar un mayor consumo de agua en comparación con plantaciones establecidas en bloque, las que afectan en menor grado la hidrología de una cuenca. De hecho, se ha demostrado que la práctica más acertada es un multiuso de la propiedad, en donde el dueño de la tierra destina solo una porción de su terreno al uso forestal y el resto a otras actividades.
- **Suelo, geología y geomorfología:** El tipo de suelo y la geología (y geomorfología) de la cuenca, pueden afectar fuertemente el consumo del agua de las especies forestales, pues dichas variables influyen en la cantidad de agua disponible en el suelo para mantener los procesos de transpiración antes mencionados, pero sobre todo determinan cuánta agua se destinará a la recarga de las napas. Sin embargo, la mayoría de las especies arbóreas son relativamente insensibles al secado del suelo, a menos que los niveles de humedad edáfica hayan alcanzado su punto de marchitez permanente. Árboles establecidos en suelos arenosos o poco profundos, son los más propensos a experimentar estrés hídrico, dando lugar a una fuerte disminución de la transpiración a través del cierre de sus estomas, pérdida del follaje, muerte regresiva de ramas y, en casos extremos, la muerte del individuo.

Por otra parte, también es necesario considerar las interacciones existentes entre el complejo suelo-vegetación y la hidrología (Figura 1). En este sentido, entre los efectos hidrológicos que ejerce una masa vegetacional, se tiene que la cubierta aérea y el fuste (interceptación) disminuyen la cantidad de precipitación que impacta directamente al suelo a través de la interceptación y también disminuyen la energía cinética de la precipitación. Así, se reduce la erosión por salpicadura y el fragmentado de los agregados del suelo. En cuanto a la efectividad del tipo de cobertura vegetal, Iroumé y Huber (2000), analizaron dos parcelas bajo diferentes tipos de dosel de bosque (Pino Oregón y Bosque nativo) y su efecto en los caudales en la región de La Araucanía, concluyendo que la precipitación directa y el escurrimiento fustal fueron de 66 mm y 8% para la parcela de bosque nativo y de 60 mm y 6% para Pino Oregón, respectivamente. Estos valores reflejan una menor capacidad de interceptación del dosel de bosque nativo, comparado con el Pino Oregón. Sin embargo, al comparar este tipo de cubiertas con una cubierta de tipo pradera o vegetación baja, se han detectado posibles reducciones en los caudales de crecida en la cuenca experimental (donde están situadas ambas parcelas), por la interceptación de las lluvias por parte de la cubierta de bosques. Estos resultados muestran la importancia de la cobertura boscosa en los procesos de interceptación, redistribución de lluvias y generación de escorrentía.

A lo anterior, se suma el efecto de la cubierta viva o muerta sobre el suelo, la que disminuye la energía cinética de la lluvia, aumentando la resistencia a la circulación superficial del flujo y disminuyendo la línea de máxima pendiente de circulación; esto se traduce en el aumento de la retención del agua proveniente de las precipitaciones, favoreciendo la infiltración y la emisión de escorrentía subsuperficial. Ward y Trimble (2004), señalan que la tasa de infiltración en bosques con suelos no alterados, normalmente excede a la intensidad de la lluvia y, por lo tanto, predominan los flujos subsuperficiales.

Por último, se encuentran los sistemas radiculares, que favorecen la infiltración del agua hacia las napas subterráneas, aumentando también la calidad de la misma. Germer *et al.* (2010), indican que en un sistema radical profundo y bien desarrollado de la vegetación arbórea, la materia orgánica, la actividad biológica del suelo, la alta porosidad y la baja densidad aparente, especialmente del horizonte A en el suelo, favorecen los flujos subsuperficiales.

Figura 1. Resumen de los efectos hidrológicos de la vegetación, en donde se indica aumento (↑) o disminución (↓) de la variable hidrológica



Fuente: Elaboración propia.

Un ejemplo de la particularidad del complejo suelo-vegetación en la producción de escorrentía, es el que ocurre en dos microcuencas ubicadas en la región del Biobío (microcuenca 1 de 74,4 ha y microcuenca 2 de 126,8 ha), las que actualmente están bajo estudio por el CTHA, a saber: microcuenca 1, en la comuna de Quirihue y microcuenca 2, en la comuna de San Fabián. Estas microcuencas tienen en común un alto porcentaje de superficie cubierta con plantaciones de Pino radiata, pendientes similares y además están situadas a una latitud similar en su punto de desagüe ($36^{\circ}13'20''$ y $36^{\circ}23'22''$, respectivamente); pero tienen como diferencia su ubicación longitudinal (la primera está ubicada en la Cordillera de la Costa y la segunda en la Precordillera Andina). Esto incide en que ambas cuencas tengan diferente monto y distribución de las precipitaciones a lo largo del año, definiéndose que en la microcuenca 2, la precipitación es un 54,7% mayor que en la microcuenca 1. Sin embargo, al establecer el caudal específico, que se refiere al caudal por unidad de superficie, la microcuenca 1 presenta un valor de caudal específico medio anual de casi 10 l/s-ha, mientras que la microcuenca 2, denota un valor cercano a 5 l/s-ha, es decir, la mitad, aunque sería esperable una situación inversa en función de las precipitaciones caídas. Una explicación preliminar podría esbozarse en base al comportamiento hidrogeológico de cada microcuenca, que podría determinar una variación en la acumulación de las reservas de agua en el tiempo. Ello estaría determinando que la microcuenca 2 es más eficiente en la recarga de los acuíferos, producto de las características geológicas del lugar y presentaría un caudal específico más alto que el de la microcuenca 1. Otro ejemplo, pero a mayor escala, es la diferencia de caudal específico que se produce entre las cuencas vecinas del estero Renegado (127 km²) que posee un caudal específico ocho veces menor que la vecina cuenca del Alto Diguillín (208 km²), ambas situadas en la ladera suroriente del volcán Chillán y en donde la lluvia que cae sobre el valle del Renegado infiltra a través de suelos arenosos y se desplaza a través de un acuífero compuesto por rocas fracturadas hasta alcanzar en forma subterránea el río Diguillín (Muñoz *et al.*, 2016). Por tanto, la variable

hidrogeológica distorsiona la aparente relación que podría existir entre las precipitaciones y la producción de agua de cada cuenca, determinando claramente que este proceso no es lineal y, por ende, se verifica que existe una alta complejidad para la comprensión de las relaciones hidrológicas en diversas cuencas hidrográficas.

II. Preguntas

A continuación, se dará respuesta a una serie de inquietudes de la población en general, relacionadas con las masas forestales en Chile.

1. ¿De dónde obtienen el agua para su desarrollo las especies arbóreas ubicadas en climas mediterráneos como el que caracteriza a la zona centro-sur de Chile?

El movimiento del agua en cuencas húmedas desde la superficie del suelo hasta las estratas más profundas, se describe utilizando el concepto de flujo de traslación, el que asume que el agua que entra en el suelo como precipitación, desplaza al agua que estaba presente en el suelo con anterioridad (Brooks *et al.*, 2009).

El agua de las primeras lluvias invernales, siguiendo el paso de un verano seco (como es el caso de los climas mediterráneos), es retenida en los microporos del suelo de tal forma que se verifica una alta retención de humedad (potencial matricial muy negativo), hasta que la transpiración vacía estos poros durante los veranos subsiguientes. El agua de lluvia no desplaza esta agua fuertemente unida a dichos microporos (Brooks *et al.*, 2009).

Las relaciones entre el uso de agua de la planta (transpiración) y la hidrología fueron examinadas cuantitativamente desde el inicio de los estudios basados en cuencas pareadas a comienzo de la década de 1920 (Bates, 1921). Estos experimentos a escala de cuencas demostraron los vínculos entre la vegetación y el caudal (por ejemplo, Bosh, 1982; Jones, 1996 y 2000).

El centro de estos mecanismos inferidos es el flujo de traslación descendente a la corriente y la mezcla de agua dentro del perfil del suelo (Hewlett y Hibbert, 1967; Horton, 1965). La mezcla completa de agua en el subsuelo es la variable central de la mayoría de los modelos de hidrología de cuencas (Alila, 2009; McDonnell *et al.*, 2007). Estos conceptos influyeron en la ecología, llegando a la idea de que las raíces toman el agua de la misma fuente que se está moviendo hacia la percolación profunda. Usando isótopos estables, Dawson y Ehleringer (1991) demostraron interacciones complejas entre el agua de la planta y las piscinas hidrológicas, evidenciando que algunos árboles de la ribera usaban aguas subterráneas más profundas en lugar de agua corriente.

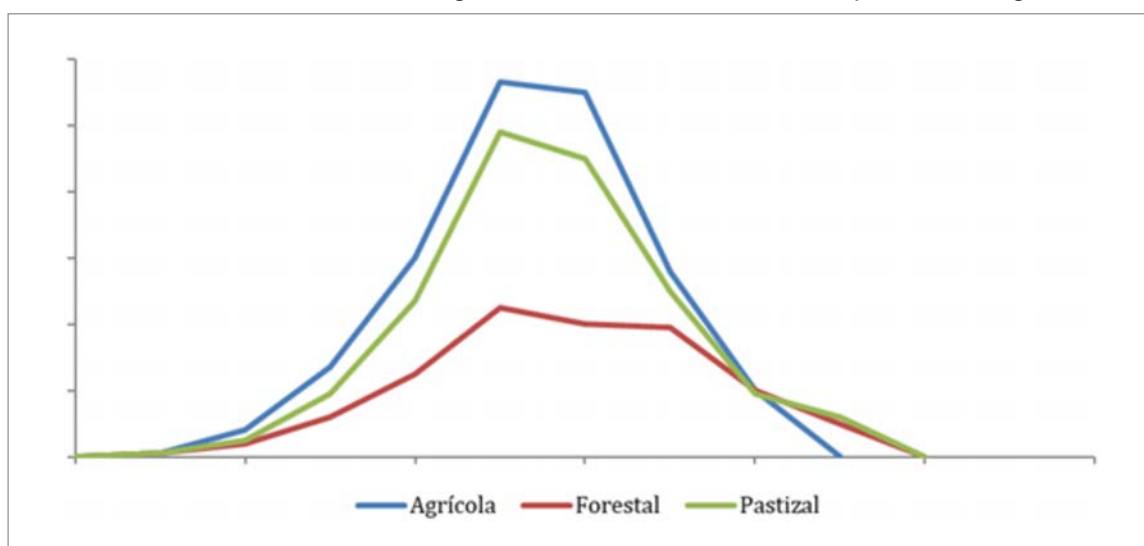
Por tanto y según lo que señalaron Brooks *et al.* (2009), los árboles en zonas mediterráneas capturan el agua desde los microporos del suelo, microporos que retienen fuertemente el agua, la que no escurre verticalmente hacia las napas freáticas ubicadas en zonas más profundas, sino que queda retenida en el suelo superficial. Esto explica el crecimiento de árboles en zonas montañosas en las que no hay ninguna posibilidad de la presencia de napas subterráneas o flujos laminares subsuperficiales que pudiesen satisfacer sus demandas hídricas.

En otras palabras, los árboles ubicados en climas mediterráneos como el de la zona centro-sur de Chile, utilizan el agua retenida en los microporos de los primeros horizontes del suelo, no alcanzando así las napas freáticas, como muchos piensan. Como es de suponerse, la situación anterior es válida solo en los casos en que las napas freáticas se ubiquen a profundidades superiores a la zona radicular, la que generalmente está entre los 0 y 3 m en profundidad, como se detalla en otras secciones de este documento.

2. ¿Qué es más eficiente desde el punto de vista hidrológico: mantener una ladera desprovista de vegetación o forestada con especies arbóreas?

Desde el punto de vista hidrológico y de la retención de los equilibrios hídricos, es indudable que es preferible tener una ladera forestada, a una sin vegetación. Lo expuesto anteriormente, se basa en que la vegetación en conjunto con el suelo (complejo suelo-vegetación) ejercen un rol regulador (ver gráfico 1) en un proceso precipitación-escorrentía (Andréassian, 2004; Unesco, 2008). Así, una vez precipitada la lluvia, este complejo la retiene en zonas altas, inclusive con pendientes pronunciadas, impidiéndole una circulación libre y disminuyendo su velocidad de tránsito aguas abajo. Con ello se propicia la posibilidad de generar una infiltración de agua en el suelo, lo que favorece una infiltración más profunda (percolación), que se traduce en una recarga de agua hacia el acuífero, aumentando o manteniendo las reservas de agua en la cuenca. Estas reservas son las responsables de la generación de los caudales estivales, especialmente en climas en los que las precipitaciones son muy bajas en el período primavera-verano.

Gráfico 1. Simulación de los hidrogramas de una cuenca con tres hipótesis de vegetación.



Fuente: Elaboración propia

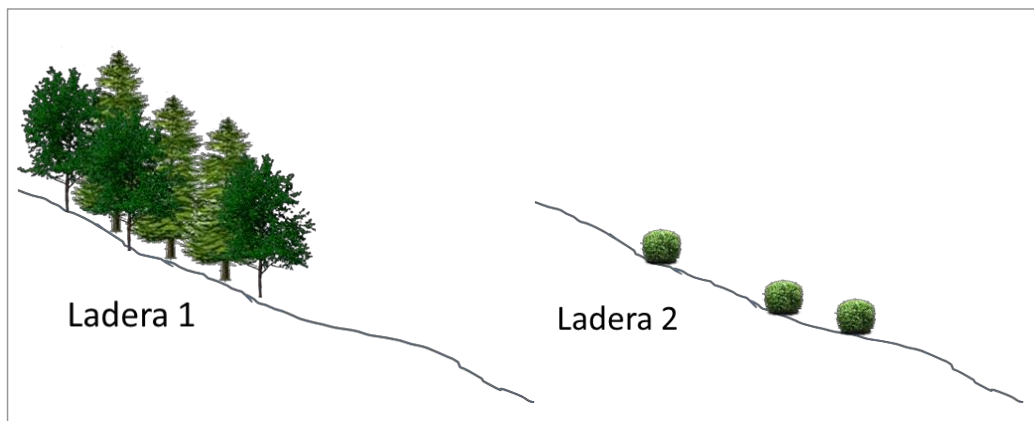
De no existir vegetación en una ladera, los suelos superficiales son erosionados, fenómeno que genera la remoción de los horizontes superficiales del suelo y una escasa capacidad de retención del agua en el suelo. En esta zona superficial, cuando se mezcla el suelo mineral con la materia orgánica aportada por la vegetación, se habilita la posibilidad de retener el agua en el suelo. Si existe, a la vez, vegetación arbórea, esta se transforma en un obstáculo notable al paso del agua, disminuyendo las velocidades de escurrimiento superficial. Bajo la ausencia del horizonte superior del suelo (el más importante desde el punto de vista productivo) y la ausencia de materia orgánica, como producto de los procesos erosivos, la saturación y/o el sellado hídrico del suelo, se producen en un corto lapso una vez iniciada una tormenta, lo que define la rápida transformación de la precipitación en escorrentía superficial, generando avenidas violentas y potencialmente dañinas. Esto mismo hace, por ejemplo, que la construcción de obras de acumulación en los cauces de la Cordillera de la Costa sean muy costosas. Tal movimiento superficial del agua posee una importante capacidad de arrastre, incrementando el fenómeno erosivo y la emisión de sedimentos aguas abajo.

Todo esto reduce el ciclo hidrológico al contexto de la precipitación y la escorrentía superficial como las variables más relevantes, descartándose de esta forma y en gran medida el rol que juega la variable hidrogeológica ligada a la posibilidad de aumentar y mantener las reservas de agua en la cuenca. Por todo lo anterior, desde un punto de vista hidrológico, siempre es preferible contar con laderas cubiertas con vegetación.

La existencia de forestación en laderas y en las riberas de los ríos juega un importante papel en la protección de la calidad del agua. Shcnorr (2013) desarrolló un estudio donde demuestra la importancia de la presencia de vegetación en las laderas y en las zonas ribereñas del río Diguillín. Esto, porque la vegetación logra proteger la calidad del agua evitando que el río alcance un alto nivel de sólidos en suspensión, producto de la contaminación difusa generada por erosión de suelos y arrastre de sedimentos.

A modo de ejemplo, se expone lo siguiente: se tienen dos laderas de condiciones climáticas, topográficas, edáficas y geológicas similares, pero con diferente densidad de cobertura vegetal. La primera ladera (Ladera 1 en la Figura 2) está densamente cubierta con vegetación, mientras que la segunda (Ladera 2 en Figura 2), prácticamente no posee cobertura vegetal.

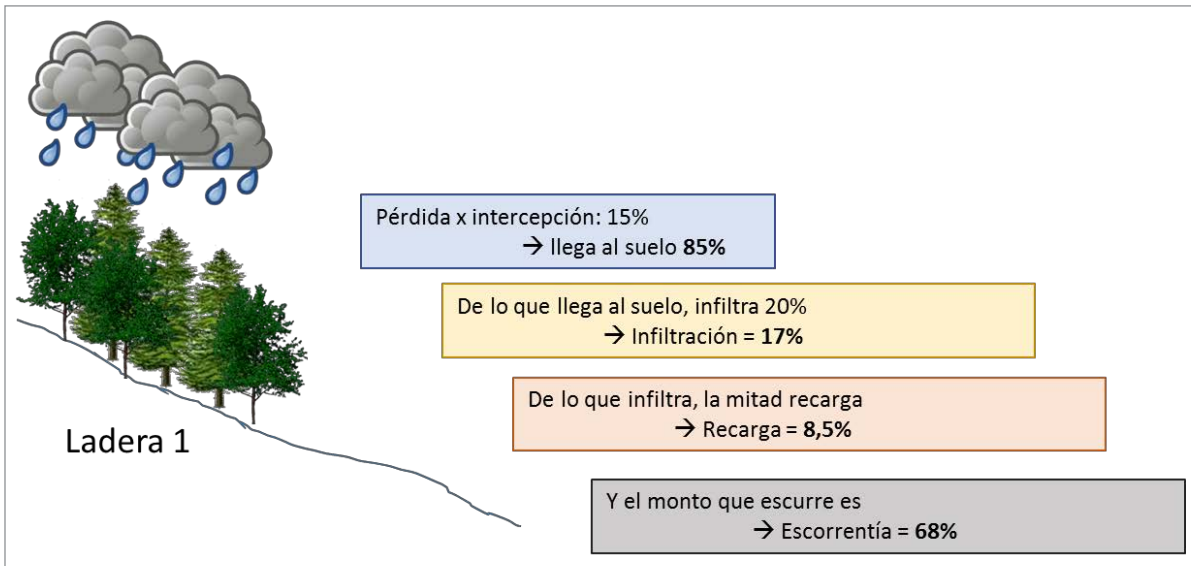
Figura 2. Laderas de similares condiciones de sitio, pero que difieren en términos de su cobertura vegetal, con una alta cobertura en la Ladera 1 (izquierda) y una baja cobertura en la Ladera 2 (derecha)



Fuente: Elaboración propia

Suponiendo que en ambas laderas cae la misma precipitación (P), entonces la Ladera 1 presentaría una pérdida aproximada de 15% de la precipitación como resultado de la interceptación de las copas y fustes de los árboles (Gerrits *et al.*, 2007; Návar, 2017). De lo que cae al suelo (ya sea directamente o a través del drenaje dentro de la copa propiamente tal), aproximadamente el 20% infiltra debido a que hay materia orgánica en el suelo y obstáculos a la circulación del agua, todo lo que retarda y dificulta la producción de escorrentía superficial. De lo que infiltra, se puede asumir que la mitad percola (8,5% de la precipitación caída). Por tanto, el monto que escurre es aproximadamente el 68% de la precipitación (Figura 3). Por supuesto que los porcentajes anteriores se ven afectados por variables como tipo de vegetación y cobertura de esta sobre el terreno, la presencia de sotobosque, la textura del suelo, la geología, la topografía y hasta el tipo y estacionalidad de la tormenta. Sin embargo, lo anterior se asemeja a lo que podría ocurrir en climas mediterráneos como el de la zona centro-sur de Chile.

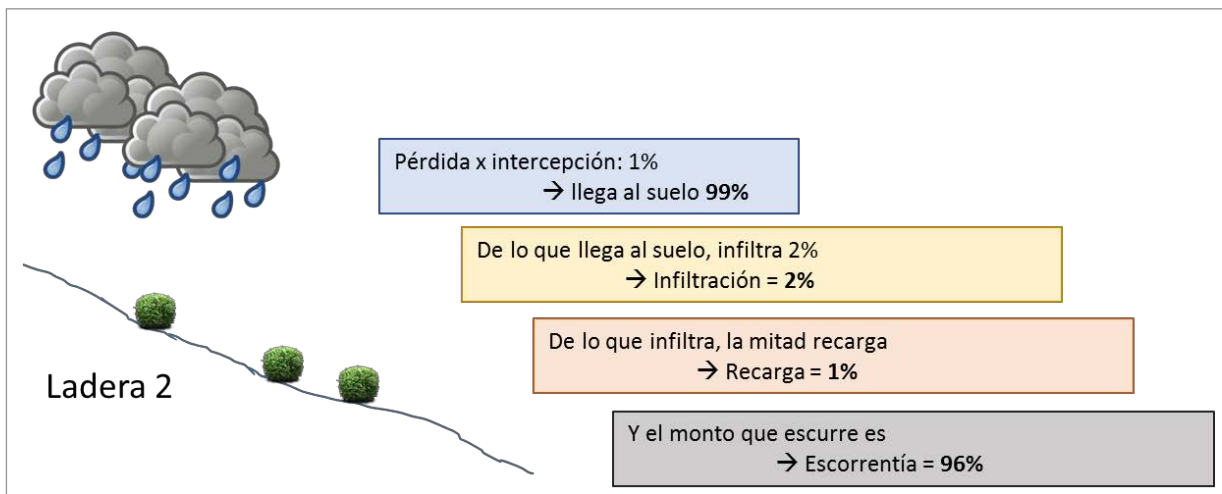
Figura 3. Distribución de los montos de precipitación en una ladera con alta densidad de vegetación



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la ladera 2 de la Figura 4, existiría solo un 1% de pérdida de la precipitación que llega al suelo. Al casi no existir materia orgánica en el suelo ni obstáculos al paso del agua, no hay suficientes elementos físicos para retardar el desplazamiento de la escorrentía superficial aguas abajo, por lo que infiltraría solo un 2%. Al ser el mismo tipo de suelo, la mitad del monto infiltrado se recargaría (1%) al acuífero. Lo anterior incidiría en que la escorrentía superficial generada fuera del 96% del monto total de precipitación.

Figura 4. Distribución de los montos de precipitación en una ladera con mínima densidad de vegetación



Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente y a través de este ejemplo, se expresa que es preferible mantener las laderas forestadas, para la retención de los equilibrios hidrológicos. Sin embargo, a esto debe sumarse la influencia que la cobertura forestal produce en la calidad del agua. Es decir, las tasas de erosión esperadas en una y otra ladera son muy diferentes. Así, en la ladera 1 serían esperables tasas de erosión ligeras o bajas, muy por debajo de 10 ton/ha/año, mientras que en la ladera 2, las tasas estarán por encima de las 20 ton/ha/año, e incluso muy por encima, según el porcentaje de desprotección del suelo de la cuenca.

Este efecto protector sustenta el argumento de que mantener laderas forestadas, mejora la calidad del agua de escurrimiento superficial, derivado que conduce menores tasas de sedimentos. Estos mismos sedimentos, en volúmenes importantes, generan problemas aguas abajo que están no solo referidos al fenómeno erosivo propiamente tal, sino que esto lleva aparejado un segundo fenómeno, que es la sedimentación aguas abajo de las partículas de suelo arrancadas, las que son depositadas en zonas de interés económico, turístico, ambiental, productivo, etc. Es decir, no es solo el fenómeno de la erosión el que está presente con sus implicancias de menor fertilidad de los suelos y de reducción de la capacidad productiva, sino que se relaciona directamente con otro como la sedimentación, que reduce la capacidad de conducción de agua de los canales de regadío; afecta la calidad de las aguas por la mayor turbidez; involucra un cambio de las características de los ecosistemas acuáticos; modifica el cauce de los ríos generando una menor capacidad de conducción de las crecidas, aumentando con ello la posibilidad de inundaciones con riesgo de pérdida de vidas humanas; e incrementa la posibilidad de descalce de las cepas de puentes y de los cimientos de obras civiles de alto costo, entre otros aspectos.

3. ¿Es cierto que las plantaciones forestales succionan el agua desde las napas (aguas subterráneas) para su desarrollo?

A través de sus raíces, los árboles satisfacen sus requerimientos hídricos y nutricionales extrayendo agua y minerales desde el suelo. Con ello, pueden reducir los minerales disueltos favoreciendo una mejor calidad de las aguas que circulan superficialmente y que se almacenan en los acuíferos. Las raíces constituyen una variable indispensable en cuanto al control de la erosión y la sedimentación, pues mantienen el suelo en su lugar. Además, las raíces superficiales finas ayudan a estabilizar el suelo, formando un conglomerado firme y difícil de romper, incluso con un reducido número de raicillas y en suelos de baja cohesividad (Morgan, 2005; García-Chevesich, 2015).

La distribución de las raíces puede ser extensa, pero muchos factores, incluyendo el tipo de suelo y su compactación, afectan su arquitectura y distribución en el medio edáfico (Crow, 2005). Variables como la especie de árbol, su edad y su estado sanitario también determinan las características radicales del individuo. Además, la disponibilidad de agua dentro del perfil, la densidad de plantación y el manejo silvícola, son todas variables que afectan la estructura radicular final. Una idea muy común y errónea con respecto a la estructura de las raíces de los árboles, es que el volumen y distribución del sistema radical se refleja en las características aéreas (tronco y copa) del individuo (Dobson, 1995). En la figura 5a se ilustra una representación más precisa de la realidad arquitectónica y distributiva general de las raíces de los árboles. De hecho, típicamente, los árboles tienen sistemas de raíces relativamente poco profundos, pero extensos (Dobson y Moffat, 1993; Dobson, 1995), siendo poco usual que las raíces penetren a una profundidad mayor de 2 - 3 m, encontrándose 80-90% de estas dentro del primer metro del perfil del suelo. A modo de ejemplo, la Figura 5b muestra un perfil radicular para *Pinus radiata* de 16 años de edad.

De este modo, las raíces de los árboles buscan nutrientes y fuentes de abastecimiento de agua, por lo que el individuo podría, en ciertos casos, alcanzar las napas freáticas, siempre y cuando las napas se encuentren a profundidades menores o iguales al área de desarrollo radicular. Por otra parte, la profundidad de las napas es variable y depende de las características geológicas de la zona, además de la época del año. No obstante, en los terrenos de uso forestal, el nivel freático se encuentra, por lo general, a más de 30 m de profundidad, por lo que los árboles difícilmente podrán alcanzar con sus raíces los acuíferos.

Figura 5. Representación esquemática de la distribución común de las raíces arbóreas dentro del perfil del suelo



Fuente: Elaboración propia.

En este sentido y como ya se ha mencionado, los árboles toman el agua retenida en los microporos del suelo de la zona vadosa (Brooks *et al.*, 2009) y no de las napas subterráneas, como popularmente se cree. No obstante, si los árboles se plantan muy cerca de los cursos superficiales de agua, habrá un importante consumo de agua, ya que las raíces consiguen capturar el flujo hipodérmico del cauce, reduciendo su caudal.

4. ¿En qué período del año se produce el mayor consumo de agua por parte de las especies arbóreas?

Los árboles, al ser seres vivos, requieren condiciones ambientales específicas para su crecimiento y desarrollo, principalmente en términos de temperatura y humedad. En el período invernal, cuando las temperaturas son más bajas, los árboles entran en latencia, es decir, disminuyen sus funciones fisiológicas y detienen su crecimiento y consumo de agua. Luego en primavera, con el aumento de la temperatura, los procesos fisiológicos se reactivan y las plantas inician su crecimiento y, por lo tanto, es cuando requieren consumir agua y nutrientes.

En el caso de Chile central, que presenta un clima mediterráneo con lluvias invernales, los árboles entran en latencia durante el otoño e invierno por lo que no pueden consumir el agua proveniente de las lluvias. De este modo, del agua caída, una parte es retenida en los microporos del suelo y el resto infiltra y percola, recargando las napas freáticas. En la primavera y verano, cuando los árboles entran en actividad, estos consumen el agua que precipitó en invierno y que quedó retenida en los microporos del suelo superficial (0-3 m).

5. Las plantaciones forestales y en general las masas forestales, ¿favorecen o no la recarga de los acuíferos, es decir, el aumento de la reserva de agua de las cuencas? ¿Son las plantaciones forestales las responsables de que se sequen los pozos, norias, esteros y ríos en verano?

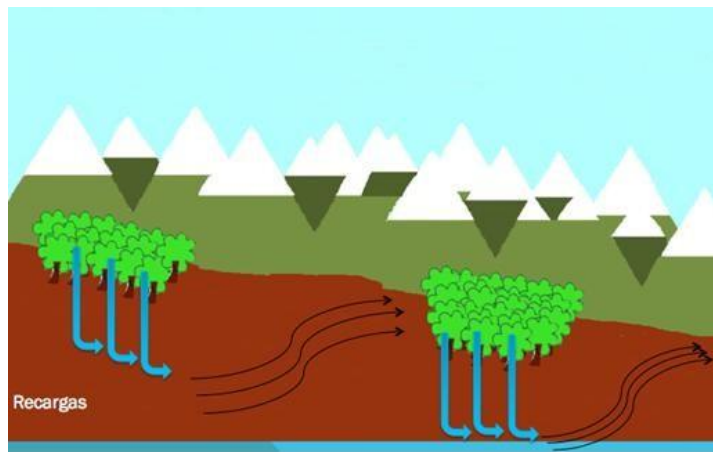
La influencia de la vegetación en el proceso precipitación-escorrentía es una relación que se ha estudiado desde hace más de 100 años, pero desde la segunda mitad del siglo XX es cuando se ha avanzado de manera más importante. Así, por ejemplo, se ha estudiado la influencia de la vegetación y las masas boscosas sobre la infiltración del agua en el suelo, en donde el continuo aporte de materia orgánica origina una estructura más granular de este, que actúa favoreciendo la infiltración (Huber y Trecaman, 2002).

López (1998) y Pizarro *et al.* (2005) señalan que algunas experiencias en España indican que el bosque genera un ecoclima particular en comparación con el de un sitio descubierto, dado que su interior se produce una reducción de la luminosidad de hasta un 90%, disminuyendo la temperatura media anual en unos 4 °C. Además, se reduce la velocidad del viento y se presentan condiciones de mayor humedad (Linsley *et al.*, 1977). Se sabe que la vegetación afecta a las precipitaciones orográficas, donde los bosques acrecientan la altura efectiva que deben remontar los vientos, traduciéndose en un aumento de las precipitaciones que va entre un 0,8% y un 1%, según experiencias centroeuropeas, en donde hay lluvia en verano.

Dentro de este mismo contexto, Pizarro *et al.* (2005) señalan que muchos autores indican que el principal efecto que tienen las plantaciones forestales sobre el balance hídrico es la cantidad de precipitación que es retenida por intercepción (Calder, 1998; Feller, 1981; Huber y Trecaman, 2001, Putuhena y Cordery, 2000). Además, Huber *et al.* (2010) estudiaron los procesos de intercepción de precipitaciones en 29 ensayos, con distintos tipos de cobertura arbórea (bosque nativo y plantaciones forestales) establecidos entre la Región del Biobío y la Región de Los Lagos. Dicha investigación estableció que las plantaciones presentan retenciones de precipitación entre el 18% y 35%, mientras que el bosque nativo presenta intercepción entre 14 y 40%, siendo las pérdidas por intercepción, en promedio, mayores en las plantaciones forestales que en los bosques nativos, aunque no parecen ser cifras significativas. Por otra parte, Huber *et al.* (2008) señalan que en zonas con baja precipitaciones y en terrenos planos se observó una menor percolación bajo bosque que bajo pradera, lo que es explicado por las pérdidas por intercepción.

La Figura 6 ilustra la zona en donde el agua que precipita es interceptada por la vegetación, disminuyendo la velocidad de caída de las gotas de lluvia y propiciando la infiltración del agua. Posteriormente, esta agua infiltra al suelo va llegando a las zonas de recarga. Así, esta agua vuelve a salir a la superficie, aguas abajo de donde infiltró y el proceso se repite nuevamente. Dicho proceso a menudo se acentúa artificialmente, mediante la construcción de ciertas hidrotecnias de drenaje, como las zanjas de infiltración (Figura 7).

Figura 6. Esquema del efecto de la vegetación sobre la recarga de acuíferos



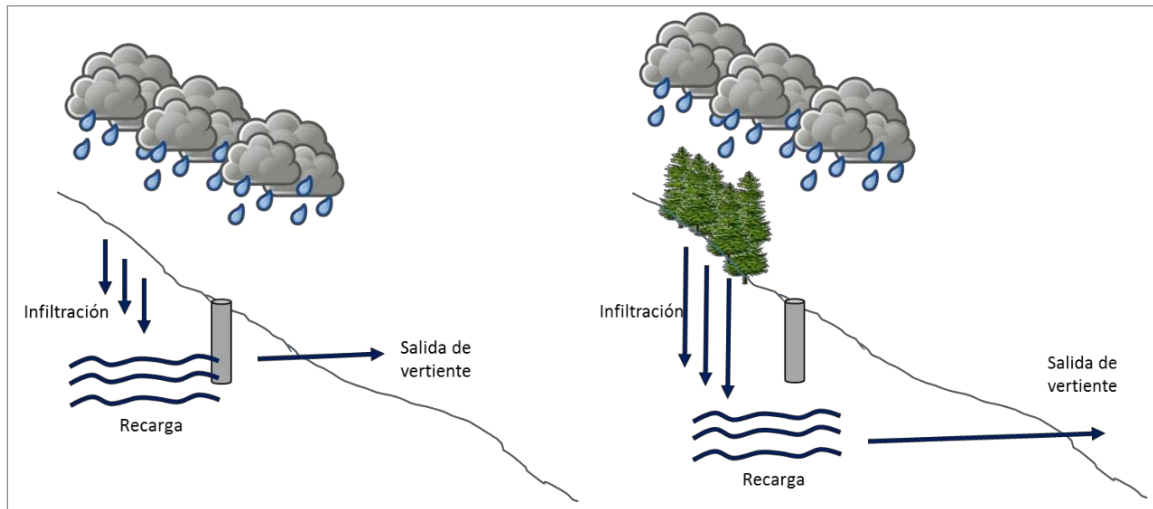
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Zanja de infiltración, la que, por medio del análisis hidrológico de la zona, permite generar infiltración en zonas con o sin vegetación



Fuente: CTHA U, de Talca.

Respecto al secado de las vertientes, pozos y/o norias situadas aguas abajo de las plantaciones forestales, este sería un fenómeno que podría tener varias causas. Una de ellas es el altísimo consumo de agua que se ha verificado en Chile en los últimos 30 años, lo que podría estar incidiendo en la disponibilidad hídrica en las distintas cuencas del país. Una segunda causa podría estar basada en la infiltración profunda que generan las masas forestales ubicadas aguas arriba, que restan del balance hídrico los volúmenes de agua que aportan a las vertientes ubicadas aguas abajo de las masas forestales, disminuyendo la producción de agua de las mismas. Es decir, y considerando un punto de vista contrario, si no existiese vegetación en la zona alta de un sector cualquiera, de acuerdo a lo planteado por Chow, Maidment y May (1998), el agua proveniente de las precipitaciones infiltraría más superficialmente (escorrentía subsuperficial), emergiendo en puntos más cercanos como vertientes y recargando pozos cercanos. Sin embargo, al establecerse masas forestales en esa zona desprovista de vegetación, el agua proveniente de las lluvias ahora se encontraría con mayor dificultad para desplazarse pendiente abajo, aumentando así la cantidad y profundidad de la infiltración, lo que generaría el efecto de que el agua ya no saldría por el mismo sitio (Figura 8).

Figura 8. Efecto de las plantaciones forestales en la recarga de acuíferos

Fuente: Elaboración propia.

Una tercera causa podría radicar en la disminución de las precipitaciones en Chile central en los últimos 10 años (Quintana y Aceituno, 2012), hecho que generaría una menor capacidad de recarga superficial de algunas vertientes, a lo que se pueden sumar factores hidrogeológicos, factores sísmicos, incendios forestales, cambios de uso del suelo, alteración de los puntos naturales de recarga de los acuíferos en la cuenca, etc. Por tanto, las razones pueden ser múltiples y multivariadas y se requiere un análisis investigativo y científico a escala local, para poder definir las causas reales.

6. ¿Cómo influyen las plantaciones forestales en la calidad de los recursos hídricos aguas abajo?

Las plantaciones forestales, particularmente las de pino, presentan un alto valor ambiental en lo que significa la captura y retención de sedimentos en zonas altas. Este proceso es importante, porque cuando los sedimentos emigran aguas abajo, se están verificando procesos de erosión que disminuyen la fertilidad de los suelos, lo que es más relevante en zonas donde la degradación previa, originada por la misma agricultura, ha sido más que centenaria y con consecuencias desastrosas (Elizalde, 1970; Torres *et al.*, 2016). Por otra parte, cuando los sedimentos emigran aguas abajo e impactan obras de riego como los canales, estos ocupan la sección útil de la obra y limitan su capacidad de conducción de agua. Asimismo, los sedimentos impactan los embalses porque reducen la vida útil de estas obras al depositarse en sus fondos y, en muchas ocasiones, producen problemas de eutrofización de las aguas. Los sedimentos también pueden determinar el descalce de las cepas en obras civiles como puentes en zonas fluviales, material fluvial, afectando la vida útil de las estructuras y de otras obras de arte, así como la seguridad de tránsito de las personas (García-Chevesich, 2015). De ahí la importancia de retener estos sedimentos en zonas altas de forma natural y mediante procesos de forestación (Quesada, 1983; UNESCO, 2010; Tadeu y Lenz, 2011).

Por otra parte, cuando la vegetación forestal logra retener los sedimentos en zonas altas, está evitando la incorporación de los mismos en los flujos de aguas circulantes. Con esto, se consigue una menor turbiedad del agua y se evita la reducción del oxígeno disuelto que permite el desarrollo de la fauna acuática; de igual manera, los sedimentos en el agua aumentan la conductividad eléctrica por la presencia de micro/macro nutrientes, afectando con ello la calidad del recurso hídrico en dicha zona (Alegre, 1991; Peña *et al.*, 1993 y Morgan, 1997).

Como complemento de lo anterior, las raíces de los árboles son capaces de capturar los macro y micronutrientes que fluyen por la cuenca y que alcanzan los cauces, con lo cual se reduce la aportación de dichos nutrientes a los cursos de agua, mejorando su calidad o reduciendo el impacto negativo que producen estos excedentes nutricionales del suelo (Brooks *et al.*, 2009).

Al respecto, el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, ha realizado un estudio referente al impacto de las plantaciones forestales sobre la emisión de sedimentos en el río Purapel, el cual aún está en proceso de revisión para ser publicado. En dicho estudio, se ha establecido que la cuenca del río Purapel, si bien ha sufrido una severa sustitución de bosque nativo por plantaciones forestales, también ha presenciado una forestación masiva de espacios degradados con plantaciones forestales, manteniendo una superficie casi constante de plantaciones desde la década de 1990. Con este antecedente, se analizó el número de curvas de descarga, correlacionándolo con los caudales máximos registrados, así como también el ancho de la sección de aforo y la emisión de sedimentos aguas abajo. Como resultado principal del estudio, se advirtió que en el tiempo hubo una disminución significativa en 50 años, del número de curvas de descarga anuales; una disminución estadísticamente significativa del ancho de la sección; y una reducción estadísticamente significativa de la producción de sedimentos aguas abajo, todo ello acrecentado desde la década de 1990, lo que permitiría inferir que las plantaciones forestales han ayudado a mitigar la emisión y el impacto de los sedimentos.

7. ¿Existen estudios que señalen que las plantaciones forestales son favorables para la retención de agua en las cuencas hidrográficas de Chile?

Existen algunos estudios en esta importante materia. Por ejemplo, Pizarro *et al.* (2005), estudiaron la influencia de las plantaciones forestales en la producción de agua de la cuenca del río Purapel, ubicada en el secano costero de la zona central de Chile. Para ello, analizaron variables hidrológicas, tanto a nivel mensual como anual, tratando de inferir el grado de influencia de la cobertura forestal en el escurrimiento superficial. La hipótesis sobre la cual se trabajó es que las plantaciones masivas inciden en una menor producción de agua. Para ello realizaron un análisis multitemporal de la vegetación en la cuenca, con el fin de determinar cómo los cambios vegetacionales influyen en la producción de agua. De este análisis de la vegetación, se determinó que existían dos períodos de características diferentes; el comprendido entre los años 1960-1978, que presentó mayor superficie cubierta por bosque nativo, mientras que entre los años 1979-2000, existió mayor superficie forestal cubierta por plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don). Estas diferencias vegetacionales fueron evaluadas a través de análisis estadísticos, considerando a cada intervalo temporal como períodos a contrastar y analizar.

Por otro lado, fue analizada la información pluviométrica y fluviométrica, entre los años 1960 y 2000. Además, se instalaron nueve pluviómetros en el año 2002, para mejorar la distribución espacial de las precipitaciones. De esta forma, analizaron el comportamiento de tres variables del balance hídrico (precipitaciones, caudales y reservas), más dos variables auxiliares (coeficientes de escorrentía y caudales máximos). En términos estadísticos, se comprobó que las series de datos no cumplían los supuestos básicos de normalidad de los residuos e igualdad de las varianzas, descartando el uso del análisis de varianza (ANDEVA) y optándose por utilizar pruebas no paramétricas.

Así, Pizarro *et al.* (2005) concluyeron que para la cuenca del río Purapel, de acuerdo al análisis multitemporal de la vegetación realizado, se produjo un proceso masivo de sustitución, reemplazándose el bosque nativo por plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don), proceso que se intensificó desde la segunda mitad de la década del 70 hasta la primera mitad de la década del 80, donde las plantaciones de pino insigne pasaron desde un 19,3% al 51,7% de la superficie,

en desmedro de la superficie cubierta por bosque nativo que pasó de un 51,8% a un 19,7%. En términos del comportamiento hidrológico de los dos tipos de bosques en la cuenca del río Purapel, los autores señalan que se puede considerar, en términos generales, que es similar para el período 1961/1978 (período de mayor superficie con bosque nativo) y el período 1979/2000 (período con mayor influencia de plantaciones forestales) y ello en función de la inexistencia de diferencias significativas a nivel mensual y anual de las variables precipitación, caudal, coeficiente de escorrentía y caudales máximos.

Además, los autores señalan que, del análisis de los resultados, se puede establecer que en la cuenca del río Purapel, el elemento más determinante en el comportamiento hidrológico es la cantidad e intensidad de las precipitaciones caídas a nivel mensual y anual, y no el tipo de cobertura vegetal boscosa. Finalmente, los autores de este documento señalan en base a la literatura consultada, que existen varias publicaciones indicando que la influencia de la cubierta vegetal está en la modificación de las condiciones físico-químicas del perfil de suelo, afectando las condiciones de permeabilidad y la capacidad de retención de humedad, con lo cual no existen antecedentes para aseverar que un cambio de la cobertura vegetal boscosa haya provocado un cambio en el régimen hídrico.

No obstante lo anterior, Little *et al.* (2009) haciendo un estudio comparativo entre las cuencas de Cauquenes y Purapel, ubicadas en la Región del Maule, encontraron tendencias a la baja en la producción de agua en áreas con influencia de plantaciones forestales. Asimismo, Lara *et al.* (2009) determinaron en un estudio realizado en 20 cuencas y microcuencas ubicadas entre las latitudes 39°37' S y 42°30' S, que existe una correlación positiva entre la presencia de bosque nativo y la producción de agua. Por otra parte, Iroumé y Palacios (2013) realizaron un estudio en grandes cuencas en la zona centro-sur de Chile, encontrando que al aumentar el área cubierta por bosques (sobre 17% de la superficie), las escorrentías superficiales presentan una tendencia a la disminución, aunque estas tendencias no son estadísticamente significativas (M-Kendall).

Adicionalmente, el CTHA realizó un estudio en el cual se analizaron datos de los últimos 20 años en las variables de caudal medio, máximo y mínimo a nivel mensual en 42 cuencas a través de la prueba estadística de Mann-Kendall. Dichas cuencas están distribuidas entre las regiones de O'Higgins y Los Lagos y tienen un uso del suelo que corresponden a bosque nativo, bosque mixto, plantación, matorral, pradera, agrícola y sin uso. De este análisis y de manera preliminar, se tiene que, para estos 20 años, un 65% de las series de datos tiene tendencia negativa; sin embargo, solo un 11,4% es significativo (con $p < 0,1$). Esto sugeriría que en la mayoría de los meses no existe evidencia significativa que indique una disminución sostenida de los caudales en la zona de estudio. Por tanto, los resultados revelan que no existe evidencia para determinar que los caudales (medios, máximos y mínimos a nivel mensual) de la zona centro-sur de Chile estén disminuyendo significativamente en los últimos 20 años, por lo que tampoco es posible vincular este supuesto comportamiento a la masa vegetal. Además, se han realizado correlaciones entre las tendencias de los caudales (valores Z de Mann-Kendall) y la cobertura vegetal de cada cuenca (bosque nativo, plantaciones forestales y cultivos agrícolas), mostrando en general una relación positiva, especialmente en las plantaciones forestales. Esto sugiere que la cubierta vegetal, aparentemente más homogénea en las plantaciones, podría estar ejerciendo un rol estabilizador de las relaciones precipitación-escorrentía superficial-recarga de acuíferos, derivado de que la vegetación actúa reteniendo las precipitaciones y favoreciendo su infiltración, especialmente en climas mediterráneos como el de Chile (Brooks *et al.*, 2009). Esto se explicaría, además, porque la mayoría de ellas se ubicaron sobre suelos muy degradados en términos de erosión y desertificación, en donde poco a poco han ido ejerciendo un efecto de restauración hidrológico-forestal, que es más notorio que en aquellas zonas en donde el bosque nativo ya ejerce este rol desde hace siglos. De ahí se derivaría que zonas con cubierta forestal permiten la aparición de caudales de estiaje que son más estables en el tiempo y en el espacio. Finalmente, se puede decir que el análisis hecho a 42 cuencas, con datos de 20 años, sugiere que no es posible afirmar que sea el tipo de uso del suelo el causante o el factor determinante de las tendencias de producción de agua para cada cuenca analizada y a nivel de caudales medios, máximos y mínimos.

8. Bajo los escenarios de cambio y variabilidad climática y del aumento de la demanda de agua; ¿es recomendable en la zona centro-sur de Chile forestar terrenos desprovistos de vegetación?

Los escenarios de incertidumbre climática, que determinan la presencia de cambios y de variabilidad en el clima, asociados a la aparición de nuevas teorías que intentan explicar procesos complejos que han redundado en disminuciones de las precipitaciones, entre otros aspectos, definen un contexto que ya era difícil de entender sin estas variables. Dicho proceso estaría generando importantes modificaciones en los climas locales de todas las regiones del planeta, en donde la zona centro-sur de Chile no es la excepción. Según estudios realizados por instituciones nacionales e internacionales (Valdes-Pineda *et al.*, 2015), los efectos del cambio climático en dicha zona de Chile se traducen en un aumento de las temperaturas, un incremento de la elevación de la isoterma cero en la alta montaña, y una concentración y disminución de las precipitaciones. En otras palabras, el cambio climático en la zona centro-sur de Chile se ve reflejado en una menor disponibilidad de agua.

Considerando lo anteriormente expuesto, así como también lo expresado en otras secciones de este documento, la forma más recomendada y factible para asegurar un mínimo equilibrio hidrológico en zonas degradadas es a través de la forestación. Indudablemente que existen interrogantes relativas a las especies a utilizar, las densidades a implementar o si se hace o no con técnicas de ingeniería hidrológica. Pero existen recomendaciones internacionales que hablan que una de las principales medidas para mitigar los efectos del cambio climático es la forestación de extensas zonas territoriales, así como reforestar los montes cuando son explotados. Lo anterior es sobre todo recomendado en climas mediterráneos, por razones ya expuestas en otras secciones de este documento.

En este contexto, la literatura científica internacional define y muestra elementos diversos en las posiciones sobre esta temática. Así, por ejemplo, existen autores que en sus investigaciones han mostrado efectos negativos de la forestación sobre los caudales base o caudales de estiaje, como Buytaer *et al.* (2007), Albaugh *et al.* (2013), López *et al.* (2014) y David *et al.* (2016). Por otro lado, otros autores no encontraron efectos negativos de la forestación sobre los caudales base, como Wine y Zou (2012) y Hawtree *et al.* (2015), además de las investigaciones en 42 cuencas que ha realizado el CTHA en la zona centro-sur de Chile, cuencas todas con superficies mayores a 100 km² y que muestran tendencias positivas de producción de agua (a nivel de volúmenes y caudales), en la medida en que se cuenta con la presencia de masas forestales. Esta diferencia en las conclusiones sobre los impactos de la forestación, se dan principalmente por la escala utilizada en el estudio. Así, los estudios que se han basado en microcuencas suelen mostrar resultados negativos al analizar las tendencias de los caudales base, pero al analizar cuencas de mayor tamaño se da lo opuesto (Hawtree *et al.*, 2015). Asimismo, si se utilizan cuencas de pequeño tamaño, menores a 50 km², se está limitando la expresión de la variable hidrogeológica en términos del ciclo hidrológico y ello determina un análisis limitado en sus variables y en las interrelaciones que se derivan.

Considerando lo anterior, se recomienda la forestación de terrenos desprovistos de vegetación en la zona centro-sur de Chile, como fuente de producción de agua en cuencas de mayor envergadura, en el mediano y largo plazo.

9. ¿Existen diferencias en el consumo de agua entre una plantación forestal y una superficie equivalente de bosque nativo? ¿Es verdad que el bosque nativo produce agua y las plantaciones forestales la consumen?

Un caso típico que ha ocurrido no solo en Chile, sino que también en gran parte de las potencias forestales internacionales, es el reemplazo de bosque nativo por plantaciones comerciales. Dicha situación ha generado una amplia lista de controversias, en términos de cuál sería la situación hidrológica de una cuenca si no se hubiesen talado los bosques originales. Pese a que, en muchos países, incluyendo Chile, ya no es legal dicha conversión, las controversias originaron una serie de estudios en base a modelos hidrológicos y cuencas experimentales, entre otros. En general, se puede decir que, al reemplazar bosque nativo por plantaciones, los estudios indican que no existen diferencias significativas en el balance hídrico de ambos usos, excepto durante los primeros años de crecimiento de los nuevos árboles establecidos. Sin embargo, estudios realizados en Sudáfrica indican reducciones en la escorrentía, cuando se ha reemplazado bosque nativo por plantaciones, detectándose cambios en el primer año (*Eucalyptus*) y tercer año (*Pinus*) después de realizada la plantación (Unesco, 2017). Esto permite inferir que los efectos hidrológicos de dicha conversión, están además en estricta relación con el tipo de vegetación preexistente, así como también con la especie comercial establecida. De igual forma, debe considerarse que Sudáfrica posee un clima que permite la aparición de importantes lluvias durante el verano, hecho que no ocurre en Chile. Al respecto, lamentablemente no se cuenta con suficiente información sobre el consumo de agua de las especies forestales nativas en Chile.

A lo anterior, se suman los resultados de los estudios/análisis citados en puntos anteriores. En el estudio de la cuenca del río Purapel, se indica que no hay diferencias significativas en la producción de agua en la misma cuenca, a pesar de la sustitución ocurrida. En el análisis hecho a los caudales en las 42 cuencas, se estaría definiendo que no hay una relación directa del tipo de uso del suelo con la emisión de escorrentía superficial, y que esta podría deberse a otros factores como el hidrogeológico. Este mismo factor podría establecerse como el causante del por qué en cuencas con proporción de cobertura vegetal similar, hay diferencias al momento de llevar el caudal a caudal específico.

Bajo este mismo contexto, no se puede afirmar que el bosque nativo sea un productor de agua y las plantaciones sean consumidoras, ya que, para realizar sus procesos fisiológicos, los árboles capturan agua a través de sus raíces; esta agua es utilizada para el transporte de nutrientes y azúcares durante los procesos de la transpiración, fotosíntesis y respiración (Miller, 1967). Koshier y Harris (2007) señalan que un 95% del agua capturada por las raíces se utiliza en la transpiración, con el fin de enfriar las hojas. A su vez Miller (1967) indica que la fotosíntesis es el proceso que menor cantidad de agua utiliza, siendo aproximadamente, un 1% del agua capturada la que se utiliza en la síntesis de azúcares, proceso esencial para la generación de biomasa vegetal.

De lo anteriormente señalado se puede inferir que el consumo de agua es necesario para el desarrollo de las masas forestales, por lo que la afirmación de que el bosque nativo produce agua no tiene fundamentos biológicos ni ecológicos. No obstante, la tasa de consumo de agua difiere entre las especies, ya sean estas introducidas o nativas, así como también difiere según la edad de los árboles. En este sentido, gran parte de las comparaciones se realizan entre bosques jóvenes (plantaciones) frente a bosques adultos (nativos) y esta diferencia en el consumo de agua puede ser el origen del mito. Una plantación comercial joven (mismo objetivo de producción) con especies nativas es muy probable que consuma agua a tasas similares a una plantación joven con otras especies.

10 ¿Cuáles serían los efectos de la remoción de la vegetación arbórea en la hidrología de una cuenca?

El manejo forestal puede tener un marcado impacto en el uso del agua de un grupo de árboles; la tala rasa es la intervención más dramática y genera cambios significativos en la hidrología de una cuenca previamente forestada. Se sabe que la tala rasa incrementa significativamente la escorrentía superficial generada durante las tormentas, hecho que se ha comprobado mediante estudios realizados en todo el mundo (e.g. Rothacher, 1970; Cline *et al.*, 1977; Scott, 1997; Hubbart *et al.*, 2007; Gabrielle *et al.*, 2018). Lo anterior se debe principalmente a la modificación de algunos componentes del ciclo hidrológico, tales como la intercepción de copa y del sotobosque (dependiendo de las técnicas de explotación), así como de las condiciones para la retención del agua en el suelo y, consecuentemente, generar infiltración profunda a los acuíferos. Sin embargo, la variable hidrológica más importante es cómo se comportan los caudales subsuperficiales y subterráneos en la cuenca, como resultado de la tala rasa, debido a que son dichos caudales los que determinan cuánta agua producirá la cuenca durante períodos estivales. En este sentido, son la geología y la edafología de la cuenca, además del clima local, los que controlan cómo se comportará la cuenca hidrológicamente tras una tala rasa total.

Como se menciona en otras secciones de este documento, las plantaciones forestales ubicadas bajo climas caracterizados por la presencia de lluvias de verano, consumen importantes cantidades de agua, hecho que se ha comprobado en incontables estudios efectuados alrededor del mundo y que se debe a que los árboles se encuentran fisiológicamente activos durante la ocurrencia de dichos eventos de precipitación. Sin embargo, el mayor efecto hidrológico de talar una plantación en climas de lluvia estival, en suelos con presencia de acuíferos cercanos a la superficie, es el aumento del nivel piezométrico de las napas freáticas, debido a la disminución de la transpiración que ocurría antes que los árboles fuesen removidos, como ya se ha mencionado.

Pese a lo expuesto anteriormente, existen dos situaciones climáticas en las que la tala rasa producirá una disminución de la recarga de napas freáticas. La primera se refiere a ecosistemas de niebla (por ejemplo, Fray Jorge), en donde la presencia de la vegetación arbórea es responsable de la condensación de la niebla que se produce en la zona costera (camanchaca). Se ha comprobado que, tras la tala de bosques en dichos climas, la condensación de la niebla finaliza, disminuyendo así la presencia de agua en el suelo y la recarga de napas.

La segunda situación en donde la tala rasa disminuye la recarga de napas, corresponde a climas en los cuales no llueve en verano, siendo este el caso de Chile central. Puesto que la precipitación ocurre en invierno, es decir, cuando los árboles se encuentran en estado de dormancia, no se produce el fenómeno de transpiración o bien este es muy bajo, lo cual hace posible que la precipitación que se infiltra en el suelo percole, recargando así las napas freáticas. Por ende, si bien la eliminación de masas boscosas en estos climas se traduce en una mayor escorrentía superficial durante las tormentas, dicha práctica de manejo forestal disminuye significativamente la recarga de los acuíferos y, por ende, la producción de agua en el largo plazo.

Por otro lado, Villegas (2004) señala que se ha demostrado el papel de las coberturas boscosas como reguladoras del caudal, favoreciendo la infiltración, gracias a la producción de una capa de hojarasca sobre el suelo mineral y a la disposición de su sistema radicular. Estas propiedades regulan el nivel freático, permiten la recarga de acuíferos alimentadores del flujo base de las corrientes, disminuyen también la cantidad de pérdidas por escorrentía directa de la superficie y retrasan la evacuación instantánea de las lluvias.

Los datos experimentales conducen a que los caudales punta de cuencas con coberturas vegetales de baja estatura, son más altos que los de las cuencas cubiertas de vegetación con estatura media y alta (árboles). En cuencas que han sido sometidas a tratamientos silviculturales, como la

remoción o la sustitución de la cobertura vegetal natural, se ha encontrado un incremento del caudal medio durante el primer año, pero ese caudal medio disminuye luego en forma logarítmica, hasta conseguir valores iguales o incluso menores que el caudal medio original. Según Villegas (2004), estos resultados deben asumirse con cuidado, porque la presencia de eventos extremos de caudal en muchos casos no está condicionada por la presencia de vegetación, sino por las características topográficas, geológicas, morfométricas y climáticas que determinan la torrencialidad de las cuencas de montaña. De ahí la importancia de establecer adecuados procesos de investigación en estas materias, en cuencas chilenas y en diferentes zonas, para representar las singularidades territoriales.

11. Las aguas que escurren superficialmente en los cursos de agua en el período estival, ¿proviene directamente de la lluvia caída en invierno?

El tiempo que tarda una gota de lluvia infiltrada en las secciones altas de una cuenca, para emerger en la red de drenaje, es en función de las características hidrogeológicas de la cuenca en cuestión. Dicho lapso se denomina tiempo de transcendencia (transient time en inglés). Así, cada cuenca posee su propio tiempo de transcendencia, el cual se puede determinar mediante un análisis isotópico (tritium), con el que se determina la edad del agua que escurre, ya sea superficialmente o subterráneamente. En Arizona, por ejemplo, en donde las cuencas son geográficamente muy extensas, se han documentado tiempos de transcendencia cercanos a los 10.000 años. Lamentablemente, en Chile no se ha estudiado lo suficiente esta importante área de la hidrología; sin embargo, se han documentado tiempos de transcendencia de menos de 10 años en la Región del Biobío, lo cual se considera bajo. En otras palabras, lo más común es que las aguas que escurren superficialmente por los cursos de agua, durante el período estival, provengan de la precipitación ocurrida varios años atrás y nunca el mismo año.

De este modo, el proceso de infiltración y salida del agua desde el acuífero puede llevar varios años (Stoner *et al.*, 1997). En este contexto, Ferré (2016) comenta que las reservas de agua en el suelo de Chile tienen un desfase, entre lo precipitado en el período invernal y lo almacenado, de más de diez años, es decir, parte de las reservas de agua provienen de años anteriores.

Además, el caudal estival puede ser producto del resurgimiento de aguas subterráneas de una cuenca cercana. En este ámbito, un estudio realizado por Pint *et al.* (2003) que midió y modeló las aguas subterráneas de la cuenca Alequash (EE.UU.), concluyó que las aguas circulantes del acuífero provenían de las precipitaciones y por aportaciones del lago Muskellunge, cercano a la zona, es decir que parte de sus reservas eran aportadas por otra cuenca en forma subterránea. En Chile existen casos similares producidos por el efecto del volcanismo reciente en la hidrogeología que genera la existencia de acuíferos de roca fracturada que conectan cuencas vecinas, como el caso de las cuencas del estero Renegado y del Alto Diguillín (Muñoz *et al.*, 2016), o la existencia de unidades geológicas producida por masivos colapsos de origen volcánicos, como es el caso del cono aluvial del Laja (Arumí *et al.*, 2012).

En base a lo señalado, no es posible afirmar con total certeza que el caudal estival dependa en su totalidad de las precipitaciones invernales al interior de la cuenca, ya que hay una variabilidad espacial y temporal de difícil cuantificación. Por ende, cada cuenca posee su propio tiempo de residencia del agua en la cuenca y debe ser estudiada hidrogeológicamente, para así poder caracterizarla en los términos ya descritos.

12. ¿Recomendaría la forestación como método de recuperación de los equilibrios hidrológicos?

Entendiendo por zonas degradadas las áreas en las que ha habido pérdida del complejo suelo-vegetación y del rol que este juega como regulador de los equilibrios hídricos al interior de una cuenca, es altamente recomendable la forestación de estas áreas para alcanzar equilibrios hidrológicos y macroecológicos a nivel de las grandes cuencas. Como ya se ha señalado, el rol del complejo suelo-vegetación es vital para asegurar la recarga de agua en los acuíferos. Esta situación no se verifica en zonas degradadas y, en general, se advierte una escorrentía superficial que se produce con una muy baja cantidad de precipitación, es decir que la saturación del suelo se produce bajo un escaso monto de lluvia y eso determina que el agua fluya superficialmente, provocando erosión y sedimentación aguas abajo.

Como se ha mencionado, las relaciones hidrológicas en los diversos ecosistemas son muy variadas y dependen de muchas variables. Estas son, por ejemplo, la precipitación (cantidad e intensidad de lluvias), la temperatura ambiente que puede generar mayor o menor evaporación, el tipo de suelo, la presencia o ausencia de la vegetación y su rol regulador, y el comportamiento de la variable hidrogeológica, que en muchos casos determina relaciones precipitación-escorrentía muy diversas.

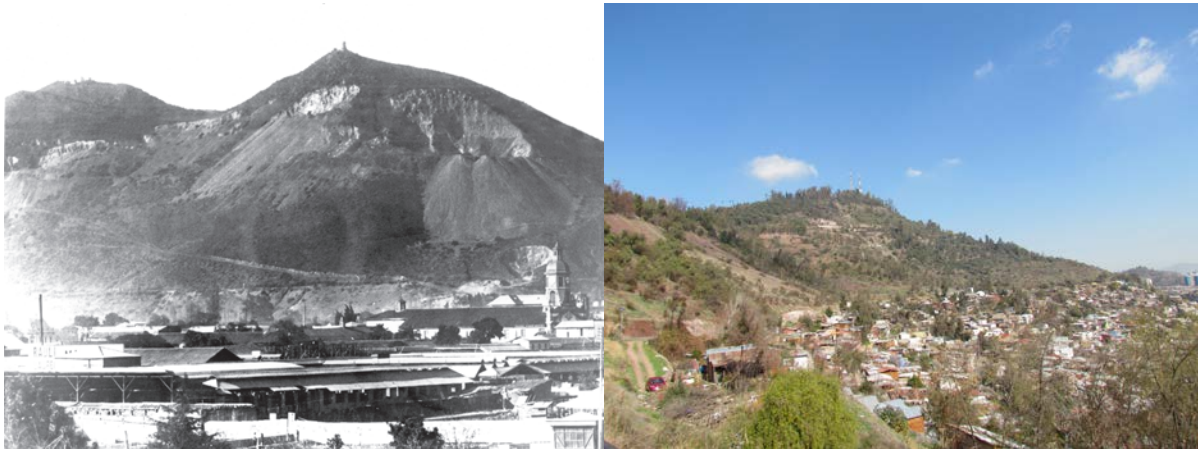
Así, por ejemplo, en zonas de Karst, que es una roca altamente permeable y degradable por el agua, un incremento de las precipitaciones no necesariamente determina un aumento de los caudales. En zonas mediterráneas españolas y francesas, un incremento de las precipitaciones define un incremento de los caudales, pero más notoriamente se verifica un incremento de la evapotranspiración (Piñol, 1991), producto de las altas temperaturas que alcanzan las zonas costeras mediterráneas en el período estival; y un incremento de la precipitación en zonas como New Hampshire, en EE.UU., determina inmediatamente un incremento notable de los caudales, aunque la evapotranspiración se mantiene estable. Esto quiere decir que cada ecosistema posee características propias y particulares, las que definen el comportamiento del proceso precipitación-escorrentía y, por tanto, es altamente relevante entender que este proceso es muy particular y correspondiente con las singularidades territoriales que presentan las cuencas hidrográficas, en diversas partes del mundo.

Otro aspecto importante de considerar en esta línea, está referido a que, si bien las masas forestales propician una mayor infiltración de agua en el suelo, lo que se verifica incluso en zonas con altas pendientes, es también cierto que esa infiltración pasa a percolación profunda en muchas oportunidades, incrementando las reservas de agua de la cuenca mediante la recarga de sus napas. Dichas reservas pueden aflorar nuevamente a los cauces superficiales, pero en zonas aguas abajo muy distantes de la que se produjo la infiltración. Esto determina que la zona alta pueda verse afectada por una reducción de agua, pero el conjunto de la cuenca se ve, en teoría, favorecida por esta acción reguladora de las masas forestales. Lo anterior es función de la hidrogeología del lugar, que determina la velocidad de paso del agua por los acuíferos y por las zonas no saturadas del suelo. Debe recordarse que la velocidad de paso del agua en las zonas superficiales se mide en metros por segundo, en tanto que las velocidades del agua subterránea se pueden explicar en metros por semana o por mes.

En Chile, existen varios ejemplos de cómo la forestación y/o reforestación de espacios degradados no solo han contribuido al mejoramiento del paisaje, sino que también han ayudado a restablecer en parte los equilibrios hídricos y ecológicos del entorno. Dentro de los ejemplos, se tiene lo ocurrido con el Cerro San Cristóbal, donde a principios de siglo se presentaba una continua emisión de sedimentos, tras las lluvias acaecidas, con impactos sobre la población cercana, como se muestra en la Figura 10. En 1921 se inició un programa de forestación y la construcción de canales de regadíos y caminos. Tres años más tarde, se inauguró el funicular y, en 1931, el zoológico de Santiago. Durante la década de los 60 se continuó con el desarrollo del cerro como parque público, con la construcción de la piscina Tupahue y la Plaza México. Actualmente es conocido como el

Parque Metropolitano de Santiago y con sus 722 hectáreas de extensión, es uno de los parques urbanos más grandes del mundo (Figura 9).

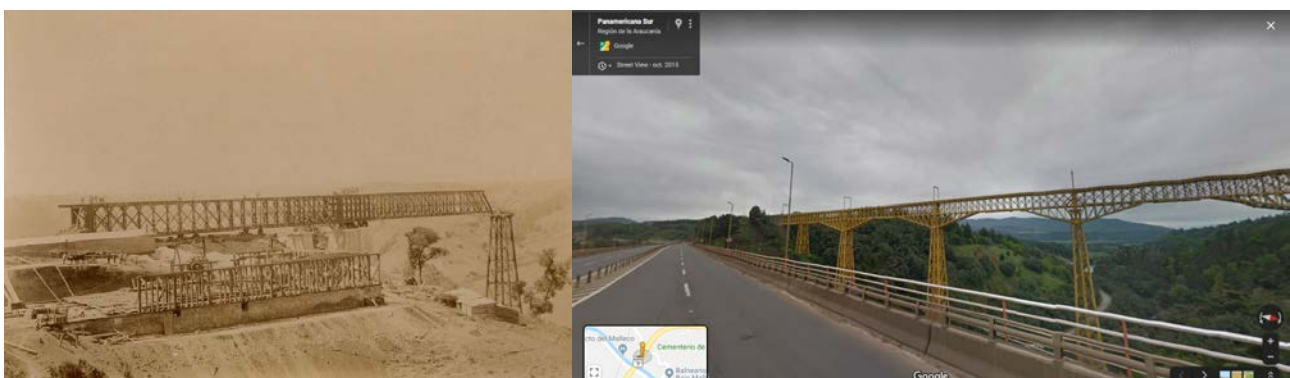
Figura 9. Proceso de forestación del cerro San Cristóbal. Año 1950 (izquierda) y actualidad (derecha)



Fuente: Izquierda: © Martín Andrade Ruiz-Tagle; derecha: © Roberto Pizarro

Otro ejemplo es el del Viaducto del Malleco, cuya construcción fue consecuencia del desarrollo industrial que se vivía en Chile durante las postrimerías del siglo XIX. Así, con su construcción se buscaba poder conectar las provincias de Malleco y Cautín al resto del país, donde existía un gran desarrollo de la agricultura. Pero, el impacto de la agricultura fue desolador, destruyendo el bosque nativo para habilitar tierras agrícolas y obtener madera y leña. Esta desolación de los suelos, trajo como consecuencia que el Gobierno de Chile tomara la iniciativa y comenzara a traer expertos para intentar revertir la devastación. Con esto, a finales de la década de 1930, la Corporación de Fomento de la Producción comienza a mencionar la necesidad de apoyar el desarrollo forestal del país y para ello plantea utilizar las tierras que existían disponibles y erosionadas, con el fin de apoyar la industria de la celulosa y de la pulpa, además de la necesidad de satisfacer las demandas madereras. La Figura 10 da cuenta de la realidad ambiental y paisajística que se vivía en Chile durante la construcción del viaducto del Malleco, y la que existe actualmente, altamente preferible en términos de los equilibrios hidrológicos.

Figura 10. Forestación del Viaducto del Malleco. Año 1888 (izquierda) y actualidad (derecha)



Fuente: Izquierda: www.memoriachilena.cl; derecha: Google Maps Street View.

Las forestaciones masivas con características boscosas han sido llevadas a cabo en Chile principalmente en base a la especie *Pinus radiata* (D. Don) y especies del género *Eucaliptus*. Estas últimas pareciera que poseen un comportamiento del tipo “oportunista”, es decir que pueden encontrarse en estado de dormancia (inactiva) en invierno, pero si la temperatura de un día sube

lo suficiente, la especie puede activarse temporalmente, absorbiendo así agua (lo que explica la constante presencia de falsos anillos en *Eucaliptus*). El *Pinus*, por otro lado, se mantiene en dormancia durante todo el período invernal, lo que se traduce en mayores volúmenes de agua para la recarga de napas freáticas.

Por lo tanto, si los procesos de intercepción y transpiración se consideran en conjunto, se podría decir que los eucaliptos utilizan más agua en comparación con el pino. Sin embargo, todo depende de las condiciones de sitio, de la textura del suelo y su capacidad de retención del agua gravitacional, la hidrogeología de la cuenca, el clima local y la genética de los individuos, entre otras variables.

Al comparar hidrológicamente especies del género *Eucaliptus* y del género *Pinus*, un estudio realizado por Huber *et al.* (2010), encontró que la evapotranspiración en las cuencas forestadas con *Eucaliptus sp* es mayor que la de las forestadas con *Pinus sp*, lo que concuerda con lo encontrado por Smakthin (2001) en cuencas sudafricanas.

Lamentablemente, la información sobre las tasas de evapotranspiración del bosque nativo chileno es limitada. Sin embargo, Echeverría *et al.* (2007) señalan que en promedio un bosque de roble-olivillo evapotranspira 1,2 mm/día en el período invernal y 3,8 mm/día en el período estival. A su vez, Gayoso e Iroumé (1995) señalan que en promedio la evapotranspiración del eucalipto es de 1,5 mm/día en invierno y 6 mm/día en verano. Cabe destacar que estos son valores promedio y su valor fluctuará dependiendo de la zona donde se encuentren ubicados los árboles.

Finalmente, en base a lo señalado, se puede concluir que tanto el bosque nativo como las plantaciones forestales son consumidores de agua. Pero, la variación del consumo en función del tiempo sería mayor en las plantaciones exóticas, especialmente en el caso del *Eucaliptus sp*, debido a que no entraría en reposo invernal (Granados y López, 2007) y esto aumentaría su consumo de agua.

13. ¿Afecta el cambio climático a la disponibilidad de agua local?

El cambio climático, entendido como la variabilidad del clima que se verifica por sobre la natural variabilidad del mismo, así como la variabilidad climática, están determinando escenarios de incertidumbre que, dependiendo de la zona del país de que se trate, podría ser explicado por fenómenos de cambio climático, o por otras teorías que plantean la existencia de oscilaciones decadales del clima (PDO, oscilación decadal del Pacífico y ADO oscilación decadal del Atlántico). Cualquiera sea la causa de los procesos climáticos que hoy se visualizan, el hecho concreto se manifiesta en la presencia de megasequías en una zona amplia del territorio nacional, lo que ha determinado un déficit de precipitación que en la zona centro sur se ha hecho muy notorio. Este déficit de precipitación involucra una reducción de las escorrentías superficiales y subterráneas y una reducción de las disponibilidades de agua para los diversos usos a los cuales se somete el recurso hídrico. Por tanto, aunque las masas forestales ejercen un rol amortiguador o efecto buffer en el proceso precipitación-escorrentía, es evidente que, si disminuye la principal entrada de agua en la cuenca, también disminuirán las disponibilidades posteriores con o sin presencia de masa arbórea.

A lo anterior se suma el hecho de que las demandas de agua en Chile se han incrementado en un 160% entre el año 1990 y 2006 según cifras de la Dirección General de Aguas, por lo que se puede señalar sin exageración que, desde el año 1990 hasta la fecha, los consumos han crecido tres veces. Entre el año 1990 y 2016, el producto interno bruto (PIB) de Chile ha crecido tres veces también. Esto habla de la altísima presión a la cual ha sido sometido el recurso hídrico que, según la Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos, determina que al menos el 60 % del PIB, sea explicado por el uso del agua. En síntesis, Chile tiene acoplado el crecimiento económico con el uso de los recursos hídricos y eso habla de una presión sobre el uso del agua que escapa a un solo sector productivo.

14. ¿Se están aplicando medidas de resguardo de la calidad del agua de las comunidades y cuáles serían las experiencias que se podrían ilustrar?

Es sabido que producto de las exigencias de certificación ambiental y de otras medidas dispuestas por las empresas forestales que trabajan en territorio chileno, existen trabajos de resguardo de la calidad de las aguas, especialmente cuando estas afectan a comunidades aledañas. Asimismo, es sabido que distintas empresas forestales permiten el uso de sus recursos hídricos a las comunidades vecinas y que las empresas están cediendo los derechos de agua que les corresponderían, a sus vecinos, constituyéndose esto en un hecho altamente inusual y muy valorable. Sin embargo, estos aspectos no son del conocimiento específico de los autores de este documento. Por tanto, son otras instancias las que deberían responder esta pregunta.

III. Conclusiones

En función del desarrollo de las preguntas y de los conceptos abordados, es posible establecer importantes conclusiones. Estas son las siguientes.

- 3.1. En climas mediterráneos, en los cuales la precipitación cae principalmente en el período invernal, es muy necesaria y recomendable la presencia de vegetación boscosa en las zonas altas de las cuencas hidrográficas, en especial en cuencas de pequeña superficie y de régimen torrencial, con el fin de proveer protección al suelo y mitigar la emisión de sedimentos aguas abajo. Asimismo, la vegetación posee por rol establecer obstáculos a la libre circulación del agua en la línea de máxima pendiente, propiciando la retención del agua en el suelo y favoreciendo la infiltración y posterior percolación.
- 3.2. La presencia de vegetación en zonas altas y medias de la cuenca es un factor central para propiciar una mayor recarga de acuíferos en países montañosos como Chile. Esto, porque la recarga tiende a producirse principalmente en los cauces, derivado de la situación de pendientes del terreno. Por tanto, la vegetación actúa como barreras vivas que, sumado al comportamiento coloidal del suelo por la presencia de materia orgánica, favorece la retención del agua y su paso a niveles subsuperficiales primeramente, para posteriormente propiciar infiltración profunda. Por ende, el rol de la vegetación es fundamental para aumentar la recarga de acuíferos, sobre todo en zonas mediterráneas con precipitaciones invernales.
- 3.3. El efecto virtuoso que ejerce el complejo suelo-vegetación, sobre la disponibilidad de agua en suelos de climas mediterráneos, se expresa en la disponibilidad hídrica que los microporos del suelo ofrecen a la vegetación en el período estival. Este hecho, de alta trascendencia edafoclimática, permite explicar el crecimiento y desarrollo de la vegetación en climas mediterráneos en períodos estivales con muy baja oferta de agua pluvial.
- 3.4. El conjunto de masas forestales, expresadas en bosques nativos y plantaciones forestales, tiende a presentar un mayor consumo de agua en los períodos estivales. Sin embargo, es en ese período cuando las ofertas de agua en climas mediterráneos son limitadas. Surge entonces la posibilidad de que las raíces sean capaces de capturar aguas desde los acuíferos, lo cual no es posible por limitaciones físicas y porque las napas se ubican en términos promedio a distancias superiores a los 20 metros, salvo que la vegetación se ubique muy cercana a cursos de agua con disponibilidades hídricas. En este sentido, y como lo han expresado diversos autores, la única posibilidad de las raíces de obtener agua es a partir de la existente en los microporos del suelo.
- 3.5. Las masas forestales proveen servicios ecosistémicos ligados a el mantenimiento de la calidad del agua. Esto es posible porque por medio de las raíces son capaces de capturar los nutrientes excedentes de las actividades humanas y de fenómenos naturales, por una parte. Por otra, las masas forestales constituyen una efectiva barrera para la retención de sedimentos en zonas altas, disminuyendo la incorporación de partículas de suelo en el agua y evitando una reducción importante del oxígeno disuelto, favoreciendo con esto último la conservación de peces y otros organismos acuáticos.
- 3.6. El consumo de agua se ha incrementado tres veces en Chile entre el año 1990 y la actualidad, derivado del crecimiento de la población y principalmente del nivel incremental que han verificado las actividades económicas que dependen del agua. En tanto, el PIB del país se ha incrementado a similar tasa en el mismo período. Este hecho da cuenta, por una parte, de una relación de acoplamiento entre el consumo de agua y el crecimiento económico, ecuación que podría no ser sustentable a futuro. Por otra parte, establece el alto nivel de presión a que están siendo sometidos los recursos hídricos. En este sentido, es recomendable mejorar la eficiencia

de los procesos productivos y tener mucha mayor claridad sobre los consumos, de tal manera de respetar las reales disponibilidades y capacidades hídricas de los ecosistemas.

- 3.7. La escasez hídrica depende de diversos factores, entre ellos el cambio y la variabilidad climática, reflejado principalmente en un incremento de las temperaturas, alzas de la isoterma cero y variaciones en el comportamiento de las precipitaciones. Adicionalmente, en Chile se verifica una sobreexplotación del recurso hídrico especialmente en zonas de secano, caracterizadas por bajas precipitaciones. En el contexto de zonas mediterráneas, no sería posible afirmar que las plantaciones forestales, como otras masas forestales, generan una menor producción de agua en las cuencas ni tampoco una mayor producción. Su rol es crear un reordenamiento temporal y espacial de los volúmenes de agua y para ello siempre utilizarán parte de las precipitaciones caídas. Asimismo, pensar que las masas forestales, del tipo que sean, incrementan la producción de agua de las cuencas, no se sustenta en la primera ley de la termodinámica, ya que una mayor producción de biomasa, indefectiblemente, debe demandar más agua.
- 3.8. Finalmente, Chile destina a ciencia y tecnología un 0,38% de su PIB, cifra muy baja para un país OCDE. Pero si se analiza cuánto se destina al agua, esta cifra cae al 0,0025%, según el Comité Chileno para el Programa Hidrológico Internacional de la Unesco. Es decir, al recurso natural más importante del país, que explicaría cerca del 60% del PIB, se le asignan escasos recursos para investigación y desarrollo. Pero es aún más grave, porque Chile es un país muy particular desde un punto de vista hidrológico, donde sus cuencas caen más de 5.000 metros en menos de 100 kilómetros; donde sus acuíferos están sobrepuestos en estratas de suelo y roca; donde las precipitaciones van desde los 4.000 mm/año promedio, hasta 1 mm/año en promedio; donde se tiene la más alta superficie de glaciares de América Latina (cerca de 22.000 km²); donde los climas van desde el hiperárido hasta los templado lluviosos, pasando por fríos de montaña y semiáridos fríos; etc. Es decir, es necesaria una política nacional que impulse un plan de I+D que apunte a la obtención de un mayor conocimiento acerca de las disponibilidades y funcionamiento de los recursos hídricos, superficiales y subterráneos, en diversos ecosistemas, y su relación con escenarios de incertidumbre climáticos y sociales. Solo de esta manera será posible establecer efectivas políticas públicas, sustentadas en conocimientos, certezas, interrogantes por dilucidar y, sobre todo, cooperación entre actores académicos, políticos, económicos y sociales.

IV. Referencias bibliográficas

- Alegre, J. (1991). Manejo y conservación de suelos y su importancia en sistemas agroforestales. En línea (visitado en 5/1/2017): <http://www.fao.org/ag/agl/ag/l/r1a128/inia/inia-i4/iniai4-03.htm>
- Alila, Y.; Kuras, P. K.; Schnorbus, M.; Hudson, R. (2009). Forests and floods: A new paradigm sheds light on age-old controversies. *Water Resources Research* 45, W08416.
- Albaugh, J.; Dye, P.; King, J. (2013). Eucalyptus and water use in South Africa. *International Journal of Forestry Research* 2013: 1-11.
- Andréassian, R. (2004). Water and forest: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 29(1): 1-27.
- Arumí, J.; Rivera, D.; Muñoz, E.; Billib, M. (2012). Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos* 12, 4-13.
- Bates, C. G. (1921). First results in the streamflow experiment Wagon Wheel Gap, Colorado. *Journal of Forestry* 19: 402-408.
- Bosch, J. M.; Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Brooks, J. R.; Barnard, H. R.; Coulombe, R.; McDonnell, J. (2009). Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geosciences* 3(2): 100-104.
- Buytaert, W.; Iñiguez, V.; Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean paramo. *Forest Ecology and Management* 251: 22-30.
- Calder, I. (1998). Water use by forest, limits and controls. *Tree Physiology*, N.º 18, pp. 625- 631.
- Crow, P. (2005). The influence of soils and species on tree root depth. *United Kingdom Forestry Commission. Information Note*. 9 p.
- David, T.; Pinto, C.; Nadezhdina, N.; David, J. (2016). Water and forests in the Mediterranean hot climate zone: a review based on a hydraulic interpretation of tree functioning. *Forest* 25(2): 1-14.
- Dawson, T. E.; Ehleringer, J. R. (1991). Streamside trees that do not use streamside water. *Nature* 350: 335-337.
- Dobson, M. (1995). Tree root systems. *Arboriculture Research and Information Note* 130. Arboricultural Advisory and Information Service, Farnham.
- Dobson, M. C.; Moffat, A. J. (1993). *The potential for woodland establishment on landfill sites*. HMSO, London.
- Echeverría, C.; Huber, A.; Taberlet, F. (2007). Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. *Bosque* 28(3): 271- 280.
- Elizalde, R. (1970). *La sobrevivencia de Chile*. Santiago de Chile: Ministerio de Agricultura, Servicio Agrícola y Ganadero. 492 p.
- Fan, J.; Oestergaard, K.; Guyot, A.; Lockington, D. (2014). Measuring and modeling rainfall interception losses by native Banksia woodland and exotic pine plantation in subtropical coastal Australia. *Journal of Hydrology* 515: 156-165.
- Feller, M. (1981). Water balance in Eucalyptus regnans, Eucalyptus oblicua and Pinus radiata forest in Victoria. *Australian Forestry* 44(3): 153-161.
- Ferré, T. (2016). Comunicación personal con el autor.
- Forest Research Institute (1990). Contribution of tree roots to slope stability. En: *What's New in Forest Research* 196.
- García, L.; Salemi, L.; Lima, W.; Frosini, S. (2018). Hydrological effects of forest plantation clear-cut on water availability: Consequences for downstream water users. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 19: 17-24.
- García-Chevesich, P. (2015). *Control de la erosión y recuperación de suelos degradados*. Outskirts Press. Denver, CO. 574 p.

- Gayoso, J.; Iroumé, A. (1995). Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque* 16(2): 3-12.
- Germer, S.; Neill, C.; Krusche, A.; Elsenbeer, H. (2010). Influence of land-use change on near- surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. *Journal of Hydrology* 380: 473-480.
- Gerrits, A.; Savenije, H.; Hoffmann, L.; Pfister, L. (2007). New technique to measure forest floor interception- an application in a beech forest in Luxembourg. *Hydrology and Earth System Sciences* 11: 695-701.
- Granados, D.; López, G. (2007). Fitogeografía y Ecología del Género *Eucalyptus*. *Chapingo*, 13(2): 143-156.
- Jones, J. A. (2000). Hydrologic processes and peak discharge response to forest removal, regrowth, and roads in 10 small experimental basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research* 36: 2621-2642.
- Jones, J. A.; Grant, G. E. (1996). Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research* 32: 959-974.
- Jofré, P.; Büchner, C.; Ipinza, R.; Bahamondes, C.; Barros, S.; García-Chevesich, P.; Cabrera, J. (2014). *Estado del arte: las plantaciones forestales y el agua*. Fundación para la Innovación Agraria (FIA) e Instituto Forestal de Chile (Infor). Gobierno de Chile. Ministerio de Agricultura. 120 p.
- Hawtree, D.; Nunes, J.; Keizer, J.; Jacinto, R.; Santos, J.; Rial, M.; Boulet, A.; Tavares, F.; Feger, K. (2015). Time series analysis of the long-term hydrologic impacts of afforestation in the Águeda watershed of north-central Portugal. *Hydrology and Earth System Science* 19: 3033-3045.
- Hewlett, J. D.; Hibbert, A. R. (1967). Forest Hydrology. In: Sopper, W. E. & Lull, H. W. (Eds.) Pp. 275-291.
- Horton, J. H.; Hawkins, R. H. (1965). Flow path of rain from soil surface to water table. *Soil Science* 100: 377-383.
- Huber, A.; R. Trecaman. (2001). Efecto de la forestación de suelos arcillosos sobre el recurso hídrico en la zona de Collipulli, IX Región, Chile. *Terra Australis* 45: 49-60.
- Huber, A.; Trecaman, R. (2002). Efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona de los arenales VIII Región, Chile. *Bosque* 23(2): 43-49.
- Huber, A.; Iroumé, A.; Bathurst, J. (2008). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes* 22(1): 142-148.
- Huber, A.; Iroumé, A.; Mohr, C.; Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque* 31(3): 219-230.
- Iroumé, A.; Huber, A. (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una Cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque* 21(1): 45-56.
- Iroume, 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: 113-125.
- Kosher, S.; Harris, R. (2007). Tree Growth and competition. *Forest Stewardship series* 5, ANR 8235, pp. 1-10.
- Lara, A.; Little, C.; Urrutia, R.; McPhee, C.; Álvarez, C.; Oyarzún, C.; Soto, D.; Donoso, P.; Nahuelhual, L.; Pino, M.; Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management* 258 (4): 415-424.
- 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.
- Linsley, R.; Kohler, M.; Paulus, J. (1977). *Hidrología para Ingeniero*. Mc Graw-Hill. Bogotá, Colombia. 386 p.
- López, F. (1994). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Tragsa y Tragsatec. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 902 p.
- López, J.; Zabalza, J.; Serrano, S.; Revuelto, J.; Gilaberte, M.; Azorín, C.; Morán, E.; García, J.; Tague, C. (2014). Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment* 493: 1222-1231.
- Maier, C.; Albaugh, T.; Cook, R.; Hall, K.; Mcinnis, D.; Johnsen, K.; Johnson, J.; Rubilar, R.; Vose, J. (2017). Comparative water use in short-rotation *Eucalyptus benthamii* and *pinus taeda* trees in the southern United States. *Forest Ecology and Management* 397: 126-138.
- McCulloch, J. S. G.; Robinson, M. (1993). History of forest hydrology. *Journal of Hydrology* 150: 189-216.

- McDonnell, J. J. (2007). Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. *Water Resources Research* 43: W07301.
- Miller, E. (1967). *Fisiología Vegetal*. Ciudad de México: UTEHA, 344 p.
- Morgan, R. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Traducido por Urbano P. & Urbano J. 1.ª edición. España: Ediciones Mundi-Prensa, 343 p.
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*, 3rd edition. Blackwell Publishing, Oxford, 2005. x + 304 pp. ISBN 1-4051-1781-8.
- Muñoz, E.; Arumí, J.; Wagener, T.; Oyarzún, R.; Parra, V. (2016). Unraveling complex hydrogeological processes in Andean basins in south-central Chile: An integrated assessment to understand hydrological dissimilarity, *Hydrol. Process* 30(26):4934-4943. doi: 10.1002/hyp.11032
- Navar, J. (2017). Fitting rainfall interception models to forest ecosystem of Mexico. *Journal of Hydrology* 548:458-470.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2007). Coping with water scarcity: Challenge of the twenty-first century. disponible en: <http://www.fao.org/3/a-aq444e.pdf>.
- Peña, L.; Carrasco, M.; Figueroa, C.; Oyarzún, B.; Lo Cascio, B. (1993). *Pérdidas por erosión hídrica en suelos agrícolas y forestales de la cuenca del río Biobío*. Proyecto EULA-Chile. Serie: Propuestas de ordenamiento, 105 p.
- Pint, C.; Hunt, R.; Anderson, M. (2003). Flowpath Delineation and Ground Water Age, Allequash Basin, Wisconsin. *Ground Water Watershed Issue* 41(7): 895-902.
- Piñol, J.; Lledó, M.; Escarré, A. (1991). Hydrological balance of two Mediterranean forested Catchment (Prades, northeast Spain). *Hydrological Sciences Journal* 36(2): 95-107.
- Pizarro, R.; Benítez, A.; Farías, C.; Jordán, C.; Santibáñez, F.; Sangüesa, C.; Flores, J.; Martínez, E.; Román, L. (2005). Influencia de las masas boscosas en el régimen hídrico de una cuenca semiárida, Chile. *Bosque* 26(1): 77-91.
- Pook, E.; Moore, H.; Hall, T. (1991). Rainfall interception by trees of *Pinus radiata* and *Eucalyptus viminalis* in a 1300 mm rainfall area of southeastern new south Wales: I. Gross losses and their variability. *Hydrological Process* 5: 127-141.
- Putuhena, W.; Cordery, I. (2000). Some hydrological effects of changing forest cover from *eucalyptus* to *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 59-72.
- Quesada, C. (1983). Impacto de la sedimentación de embalses y la alteración de caudales en la generación de energía firme. Experiences in the development and Application of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources in Latin America.
- Quintana, J.; Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43°S. *Atmósfera* 25(1): 1-22.
- Serrano, P.; Nadal, R.; Lana, N. (2014). *La relación suelo-vegetación y su influencia en el comportamiento hidrológico de distintos ambientes vegetales*. *Geoecología, Cambio ambiental y Paisaje*. Homenaje al Profesor José María García Ruiz, J. Arnáez, P. González Sampérez, T. Lasanta, B. L. Valero Garcés (eds.). Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Universidad de La Rioja- Logroño: 217-228.
- Smakhtin, V. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240: 147-186.
- Shcnorr, C. (2013). *Model based study of sediment and nutrient management in an Andean watershed*. Master Thesis from Universidad de Leibniz Hannover. 188 pp
- Stoner, J.; Cowdery, T.; Puckett, L. (1997). Ground-Water age dating and other tools used to assess land-use effects on water quality. *Water-Resources Investigation Reports* 97: 4150.
- Tadeu, N.; Lenz, A. (2011). Identificación y análisis de patologías en puentes de carreteras urbanas y rurales. *Revista Ingeniería de Construcción* 26(1): 05-24.
- Torres, R.; Azócar, G.; Carrasco, N.; Zambrano, M.; Costa, T.; Bolin, B. (2016). Desarrollo forestal, escasez hídrica, y la protesta social Mapuche por la justicia ambiental en Chile. *Ambiente & Sociedad* 19(1): 121-146
- UNESCO, 2008. Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña. *Documentos Técnicos del PHI-LAC* N.º 13.

UNESCO (2010). Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. Brea, D.; Balocchi, F. (Eds.). *Documentos Técnicos del PHI-LAC* N.º 22.

UNESCO (2017). Forest management and the impact on water resources: a review of 13 countries. IHP-VIII/ *Technical document N.º 37 Latin America and the Caribbean*.

Villegas, J. (2004). Análisis del comportamiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Anitoquia. *Revista EIA* 1: 73-79.

Ward, A. D.; Trimble, S. W. (2004). *Environmental Hydrology*. London: Lewis Publishers CRC Press Company, 472 p.

Wine, M.; Zou, C. (2012). *Long-term streamflow relations with riparian gallery forest expansion into tallgrass prairie in the Southern Great Plains*. USA: Forest.



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa
Hidrológico
Internacional