



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**EFFECTO DEL REEMPLAZO DEL MATORRAL NATIVO POR
PLANTACIONES DE PINO EN LA EVOPOTRANSPIRACIÓN REAL
Y PERCOLACIÓN PARA EL PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO EN
LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES**

**EFFECT OF NATIVE SHRUBLAND REPLACEMENT BY PINE
PLANTATIONS ON ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION AND
PERCOLATION FOR HISTORICAL AND FUTURE PERIODS IN
THE CAUQUENES RIVER BASIN**

Tesis para optar al título de Ingeniera Agrónoma y
al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

ELIZABETH VIRGINIA RAMÍREZ ZAMORANO

Director de Tesis
Dr. Mauricio Galleguillos Torres
Dr. Oscar Seguel Seguel

Profesores consejeros
Dr. Cristian Kremer Fariña
Dr. Juan Pablo Fuentes Espoz

SANTIAGO - CHILE
2021

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

EFECTO DEL REEMPLAZO DEL MATORRAL NATIVO POR PLANTACIONES DE
PINO EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL Y PERCOLACIÓN PARA EL
PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO EN LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al título de
Ingeniera Agrónoma y al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

ELIZABETH VIRGINIA RAMÍREZ ZAMORANO

| | Calificaciones (Memoria de Título) | Calificaciones (Tesis de Grado) |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| DIRECTOR DE TESIS/AFE | | |
| Mauricio Galleguillos Torres Ingeniero Agrónomo, Dr. | 7,0 | 7,0 |
| Oscar Seguel Seguel Ingeniero Agrónomo, Dr. | 7,0 | 7,0 |
| PROFESORES CONSEJEROS | | |
| Cristian Kremer Fariña Ingeniero Agrónomo, Dr. | 7,0 | 7,0 |
| Juan Pablo Fuentes Espoz Ingeniero Forestal, Dr. | 6,8 | 6,8 |

Santiago, Chile
2021

AGRADECIMIENTOS

Que difícil agradecer a tantas personas que han aportado para que pudiera terminar la carrera, pero empezaré desde mi pequeño núcleo familiar, que me ha apoyado desde niña en todo lo que he deseado hacer. A mis padres, Sandra Zamorano Cañas y David Ramírez Rojas, por todo su apoyo, amor y cariño que me dan a diario, por cuidarme, por preocuparse desde mi alimentación hasta si dormí bien y por dejar que me dedicara a esto a tiempo completo, sin exigirme nada. A Mario, que ha actuado como el hermano mayor (siendo que soy yo), por su apoyo, por preocuparse de mi cuando estoy lejos, por su sentido del humor y todas las bromas que me decía sobre el término de mi tesis (no alcanzaron a pasar 84 años). A mi hermana Graciela, por darme ánimo y siempre escuchar mis frustraciones, por su carisma que la caracteriza y por ser mi mejor amiga. A mi pequeño gran Ezequiel, mi hermanito menor, que siempre está interesado en lo que estoy estudiando y con sus difíciles preguntas me hacía investigar para tener respuestas a su altura. A mis primas, Daniela y Abigail Ramírez Araya, por ser como mis hermanas, siempre cuento con ellas y sé que siempre seremos las tres mellizas que nos decían cuando pequeñas. A mis tíos, Carlos Ramírez y Sergio Zamorano, tengo solo dos tíos, pero equivalen a muchos, son lejos los mejores. A mi tía Ester que siempre es tan acogedora en su casa y a mi tía Jeannette que recurrentemente me preguntaba cómo me estaba yendo. A mi pequeña güeli, Iris Rojas, que siempre nos apoya en todo lo que está a su alcance, desde niños nos acompañaba a los actos del colegio, fue mi apoderada y hasta el día de hoy se preocupa de todo y de todos.

También quiero mencionar a mi abuelita María Mercedes Cañas, si bien ella ya no puede leer estas líneas, mientras estuvo conmigo, me ayudó en todo lo que pudo, de su huerta me cosechó varias muestras que necesité para el herbario de Taxonomía, ella me hablaba de la tierra, de los cultivos, y de su vida en Vichuquén, lo poco que sabía de agricultura antes de entrar a estudiar, lo conocía porque ella me lo enseñó. Así, como algunas flores tienen que entrar en senescencia, otras empiezan a florecer y a dar luz en la vida, como cuando nació el pequeño Gaspar, que ha sido una explosión de felicidad y amor para todos, lo debo mencionar porque sin él saberlo, me ha dado alegría y ánimo con sus locuras y aventuras en el barro, cuando juega con las gallinas y cuando cosecha frutas con sus pequeñas manos.

A mis profesores guías, Mauricio Galleguillos y Oscar Seguel, ambos tienen en común que, aunque pasan las generaciones de alumnos y los semestres, ellos siguen tan interesados en lo que están enseñando e investigando, se nota que les apasiona a lo que se dedican, y esa motivación para las personas que estamos aprendiendo es inspiradora. También agradecerles a ambos por haber estado atentos y presentes a lo largo de todo este trabajo.

A mis partner en la U: Belén Bustamante, Catherine Vargas y Constanza Olmedo, con ellas pasábamos largas tardes en la biblioteca, por esos videos podando las viñas o por la versión de la Temporera Antumapu y por todas esas risas que hacían más llevaderos los días. Al Alonso, Mauri y a todos los chiquill@s de la facultad con los que entable una amistad. Al clan de suelos que formamos con el Edu, Felipe, Samuel, y Cathy, por todos esos viajes y terrenos juntos, fueron un muy buen grupo. A la Vale y al Benja, por esas largas conversaciones llenas de risas y por ser el clan de cálculo durante años. A todos los

chiquill@s del laboratorio de Física de Suelos, a don Hugo y a los internacionales como Lwando y Berthin y a ese grato ambiente de compañerismo que hay en el laboratorio. A los chiquill@s del LabMME, a Emi, Naty y en especial a Cristóbal, Lucas y Fernando, por siempre estar dispuestos a ayudar a los tesisistas en todo lo que necesitábamos y por todos esos terrenos a Cauquenes de trabajo en equipo. A David Aguilera con su ayuda en lo del Sap Flow, van a ser inolvidable las dos veces que fuimos a instalar ese equipo (jornadas maratónicas).

A las funcionarias de postgrado, a Marjorie y Mercedes, extraño esas conversaciones en postgrado, ellas hacen de ese lugar un ambiente tan acogedor. A Jeannette por responder mis incontables dudas y tenerme mucha paciencia. Al profe Osvaldo, por haberme escuchado y orientado en todo lo que necesite durante mi estadía en el magíster.

A Carlos Faúndez, por orientarme en todas las inquietudes que tenía sobre HYDRUS. A Estefanía por esa primera inducción en el programa. A Ariel de la U. de Valparaíso y a Jonathan de la U. Austral, por darse el tiempo de recibirme y enseñarme lo que ellos sabían del equipo de flujo de savia.

A mis profes que me recibieron de ayudante durante años: al profe Cristian Kremer, por esos tres años en Riego y Drenaje, que me fueron de mucha ayuda para entender los fundamentos que después apliqué en la tesis, a la profe Tere Torres por todas esas largas conversaciones de la Física y a mi querida profe Sonia Acevedo, con la que estuve en Cálculo durante toda la carrera, ella siempre me preguntaba cuando iba a terminar la tesis, si bien ella ya no está aquí, me dejó ese gran grupito que formamos con la Vale y el Benja.

Finalmente, agradecer al FONDECYT Regular - CONICYT 1171560, 2017-2021, “Assessing spatio-temporal impacts of global change on water and biomass production processes catchment scale: a synergistic approach based on remote sensing and coupled hydrological models to improve sustainable management of forest ecosystems”, por haber financiado esta investigación y a todos los propietarios de los sitios de estudio en Cauquenes que nos permitieron entrar a sus tierras para hacer esta investigación.

“Cuando tengas un problema, tienes que intentar buscar la solución, siempre, pero siempre habrá una solución, solo tienes que buscarla”

SZE

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----------|
| MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 1 |
| HIPÓTESIS | 5 |
| OBJETIVOS..... | 5 |
| Objetivo general | 5 |
| Objetivos específicos..... | 5 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 6 |
| Sitio de estudio | 6 |
| I. Implementación del modelo de transferencia hídricas para estimar del consumo de agua de cada cobertura | 9 |
| 1. Modelación de la evapotranspiración..... | 9 |
| 2. Procedimiento para estimar el consumo de agua | 11 |
| II. Evapotranspiración real y percolación histórica y futura en los sitios de estudio. | 20 |
| 1. Periodo histórico (1979-2019)..... | 20 |
| 2. Periodo futuro (2020-2046)..... | 21 |
| III. Efecto del cambio de uso/cobertura de suelo sobre la evapotranspiración real y percolación de la cuenca..... | 222 |
| Análisis estadístico | 23 |
| RESULTADOS..... | 24 |
| I. Implementación del modelo de transferencias hídricas | 24 |
| 1. Datos de suelo para la derivación de los parámetros de van Genuchten y conductividad hidráulica saturada | 24 |
| 2. Parámetros de cobertura foliar (IAF y k) | 26 |
| 3. Calibración y verificación de HYDRUS-1D con los contenido de agua del suelo | 26 |
| 4. Simulación a escala diaria | 29 |
| 5. Verificación de la transpiración a través del flujo de savia..... | 30 |
| II. Evapotranspiración y percolación/capilaridad histórica y futura en los sitios de estudio | 31 |
| 1. Dinámica y análisis de tendencia de la evapotranspiración real y percolación/capilaridad histórica (1979-2019) | 31 |
| 2. Evapotranspiración real y percolación/capilaridad en escenarios futuros (2020-2046), periodo de referencia (1979-2005) y megasequía (2010-2019). Diferencias relativas entre el periodo de referencia y escenarios futuros | 36 |
| III. Efecto del cambio de uso/cobertura de suelo sobre la evapotranspiración real y percolación de la cuenca..... | 40 |

| | |
|---|-----------|
| DISCUSIÓN | 43 |
| I. Implementación del modelo de transferencia hídricas..... | 43 |
| 1. Calibración y verificación a través de mediciones de contenido de agua en el suelo | 43 |
| 2. Verificación de la transpiración a través del flujo de savia..... | 45 |
| II. Evapotranspiración real y percolación/capilaridad histórica (1979-2019) y en los escenarios futuros (2020-2046) | 47 |
| 1. Análisis de los montos de ETr y percolación/capilaridad | 47 |
| 2. Proyecciones de la ETr y percolación bajo escenarios futuros de cambio climático | 49 |
| III. Efecto del cambio de uso/cobertura de suelo sobre la evapotranspiración real y percolación de la cuenca..... | 50 |
| CONCLUSIONES..... | 53 |
| LITERATURA CITADA | 54 |
| APÉNDICES..... | 64 |
| Apéndice 1.1. Descripciones de las características físicas y morfológicas de los perfiles. | 64 |
| Apéndice 1.2. Fotografías de los perfiles descritos: Matorral La Granja, Pino La Granja, Matorral Carmen Alto, Pino San Pedro, Matorral San Agustín y Pino San Agustín. | 70 |
| Apéndice 2. Parámetros físicos medidos en laboratorio para cada horizonte en cada sitio. | 71 |
| Apéndice 3. Esquema del factor de abundancia de raíces ingresado a HYDRUS en cada sitio de estudio. | 72 |
| Apéndice 4. Relación entre la ETo Hargreaves y ETo Penman-Monteith reconstruida con los datos de la estación meteorológica INIA-Cauquenes entre los años 2010 y 2019. | 72 |
| Apéndice 5. Validación de la ETo Hargreaves calculada con el producto CR2MET y con las estaciones meteorológicas INIA-Cauquenes y Los Despachos. | 72 |
| Apéndice 6. Curvas de retención de agua y mediciones de laboratorio de todos los horizontes de cada sitio. | 73 |
| Apéndice 7. Dinámica del Índice de Área Foliar (<i>IAF</i>) de las praderas a lo largo de un año hidrológico..... | 76 |
| Apéndice 8. Curvas de calibración del contenido de agua medido por los sensores (θ_S) versus el contenido de agua medido en laboratorio (θ_L) en cada sitio de estudio..... | 76 |
| Apéndice 9.1. Métricas estadísticas entre lo observado por los sensores y lo simulado por el modelo a las distintas profundidades del sitio matorral Carmen Alto..... | 76 |
| Apéndice 9.2. Métricas estadísticas entre lo observado por los sensores y lo simulado por el modelo a las distintas profundidades del sitio pino San Pedro..... | 77 |
| Apéndice 10.1. ETr y línea de tendencia para cada sitio entre 1979 a 2019..... | 77 |

| | |
|---|-----------|
| Apéndice 10.2. Per/cap y línea de tendencia para cada sitio desde 1979 a 2019..... | 77 |
| Apéndice 11.1. Diferencias relativas estacionales en la evapotranspiración real (ETr) entre el periodo de referencia (1979-2005) y los escenarios futuros (2020-2046) para cada sitio. | 78 |
| Apéndice 11.2. Diferencias relativas estacionales en la percolación/capilaridad (Per/cap) entre el periodo de referencia (1979-2005) y los escenarios futuros (2020-2046) para cada sitio. | 79 |
| Apéndice 12.1. Cambio en la evapotranspiración real al tener plantaciones de pino en vez de matorrales. | 80 |
| Apéndice 12.2. Cambio en la percolación al tener plantaciones de pino en vez de matorrales. | 80 |
| ANEXOS | 81 |
| Anexo 1. Climograma estación meteorológica de Cauquenes de los periodos 1979-2009 y 2010-2019..... | 81 |
| Anexo 2. Mapa de pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff (2006). | 81 |
| Anexo 3. Adaptación del Mapa Geológico de Chile (Sernageomin, 2003) (izquierda); mapa de las Series y Asociaciones de suelos (CIREN, 1997) (derecha) presenten en la cuenca de estudio. | 82 |
| Anexo 4. Comparación de las Asociaciones/Series de suelos de la cuenca (CIREN, 1997). | 82 |
| Anexo 5. Parámetros propuestos para el modelo S-shaped (Grinevskii, 2011). | 83 |
| Anexo 6. Calibración inversa de parámetros a través de HYDRUS-1D (Simunek et al., 2013). | 83 |
| Anexo 7. Explicación del método “Gap Fraction” del CI-110 Plant Canopy Imager (Bio-Science, 2018). | 83 |
| Anexo 8. Principio de los sensores FDR. | 85 |
| Anexo 9. Medición de resistividad a través de Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) (Santander, 2020). | 85 |
| Anexo 10. Método Delta para escenarios de cambio climático (Quilbé et al., 2008). | 85 |
| Anexo 11. Variación (%) en las precipitaciones y temperaturas en los escenarios futuros según Galleguillos et al. (2021). | 86 |
| 11.1 Variación (%) en las precipitaciones mensuales en los escenarios futuros. | 86 |
| Anexo 12. Valores de conductividad hidráulica saturada (K_s) y del parámetro α y n del modelo de retención de agua de van Genuchten para distintos tipos de suelo (Carsel y Parrish, 1988). | 87 |
| Anexo 13. Imágenes de dron de cada uno de los sitios de matorral (.....) | 87 |
| Anexo 14. Contenidos de materia orgánica (%) en cuatro de los sitios de estudio (Macari, 2019). | 87 |
| Anexo 15. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). | 88 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Datos generales y ubicación de las estaciones meteorológicas usadas en el estudio. | 7 |
| Cuadro 2. Edad, densidad, altura ubicación y sensores usados en cada cobertura y sitio de estudio. | 7 |
| Cuadro 3. Variación en la precipitación, temperatura máxima (T máx.) y mínima (T mín.) en los escenarios futuros. | 21 |
| Cuadro 4. Métricas estadísticas con sus respectivas fórmulas e interpretaciones. | 23 |
| Cuadro 5. Parámetros de van Genuchten y conductividades hidráulicas de cada horizonte (H) de los perfiles analizados en cada sitio del estudio. | 25 |
| Cuadro 6. Promedio del índice de área foliar (<i>IAF</i>) y del coeficiente de extinción (<i>k</i>). | 26 |
| Cuadro 7. Estadística del periodo de calibración y verificación a escala diaria. | 30 |
| Cuadro 8. Pendiente de sen (P_{sen}) y significancia de la tendencia de la evapotranspiración real y percolación anuales desde 1979 a 2019 en cada sitio de estudio. | 34 |
| Cuadro 9. Pendiente de sen (P_{sen}) y significancia de la tendencia de la evapotranspiración real y percolación estacionales desde 1979 a 2019 para cada sitio del estudio. | 36 |
| Cuadro 10. Mediana (<i>Me</i>), cuartiles (Q_1 y Q_3) y rango de la evapotranspiración real para cada sitio-cobertura separados en los periodos de referencia (Ref.), megasequía y escenarios futuros. | 37 |
| Cuadro 11. Mediana (<i>Me</i>), cuartiles (Q_1 y Q_3) y rango de la percolación/capilaridad para cada sitio-cobertura separados en los periodos de referencia (Ref.), megasequía y escenarios futuros. | 38 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa del área de estudio, con los sitios y estaciones meteorológicas utilizadas. . | 6 |
| Figura 2. Fotografías de los sitios de matorral (superior) y de los sitios de pinos (inferior). | 9 |
| Figura 3. Esquema de la función S-shaped propuesta por van Genuchten (1987). | 10 |
| Figura 4. Diagrama de los pasos a seguir para estimar el consumo de agua de cada cobertura. (a: arena, L: limo, A: arcilla, θ : contenido de agua volumétrico en el suelo). | 12 |
| Figura 5. Imagen procesada del software CI-110 para matorral (izquierda) y pino (derecha) en el sitio La Granja. | 14 |
| Figura 6. Esquema de la albura y de un núcleo incremental del tronco. | 19 |
| Figura 7. Mapa de las áreas cubiertas por plantaciones de pino donde debería haber matorral. | 22 |
| Figura 8. Curvas de observación de los sensores y simulación de HYDRUS para cada nodo en los perfiles de suelo de los sitios de matorrales. | 27 |
| Figura 9. Curvas de observación de los sensores y simulación de HYDRUS para cada nodo en los perfiles de suelo de los sitios de plantación de pino. | 28 |
| Figura 10. Almacenamiento de agua del suelo observado y simulado en los distintos sitios. | 29 |
| Figura 11. Relación entre la transpiración diaria obtenida del flujo de savia y la estimación de HYDRUS para matorral (izquierda) y pino (derecha). | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 12. Dinámica de la transpiración diaria de matorral y pino medidos con el flujo de savia y estimadas con HYDRUS..... | 31 |
| Figura 13. Dinámica de la Pp, ETo, ETr, Per/cap anuales desde 1979 al 2019 en los sitios de matorral y pino (en cada caso se presenta la variabilidad con un color degradado alrededor de la línea promedio)..... | 33 |
| Figura 14. Variaciones estacionales de la evapotranspiración real (izquierda) y la percolación/capilaridad (derecha) con sus líneas de tendencia para cada sitio desde 1979 a 2019..... | 35 |
| Figura 15. Diferencia relativa de la evapotranspiración real (a) y percolación/capilaridad (b) anual para los tres escenarios futuros con respecto al periodo de referencia..... | 39 |
| Figura 16. Cambio en la evapotranspiración real anual producto del reemplazo de matorrales por plantaciones de pinos en los distintos periodos de análisis. | 40 |
| Figura 17. Cambio en la percolación anual producto del reemplazo de matorrales por plantaciones de pinos en los distintos periodos de análisis..... | 41 |

RESUMEN

La continua expansión de las plantaciones exóticas de pino ha generado el reemplazo de la vegetación nativa como es el caso del matorral espinoso, esto podría traer consecuencias en el ciclo hidrológico de las zonas donde ocurre este cambio de uso del suelo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del reemplazo de áreas de matorrales de *Acacia caven* por plantaciones forestales de *Pinus radiata* en las tasas de evapotranspiración real (ETr) y percolación históricas y futuras en la cuenca pluvial del río Cauquenes. Se implementó el modelo HYDRUS-1D para cuantificar la ETr y percolación bajo diferentes escenarios de clima pasado, presente y futuro en tres repeticiones por cobertura. Las verificaciones del contenido de agua en el suelo y transpiración del modelo fueron satisfactorias arrojando valores de $R^2 > 0,9$, $KGE > 0,85$ y $PBIAS < 10\%$, y de $R^2 > 0,7$, $KGE > 0,55$ y $PBIAS < 15\%$, respectivamente. Los resultados indican que desde 1979 al 2019 ha habido un decrecimiento de la tasa de ETr y percolación en ambas coberturas, en especial durante el periodo de megasequía (2010-2019). Las diferencias anuales entre coberturas indican que las plantaciones evapotranspiran entre 180 a 214 mm año⁻¹ más que matorral y que los matorrales percolan entre 184 a 237 mm año⁻¹ más que pinos, independientes del escenario que se analice. En los escenarios futuros, ambas coberturas decrecerán su percolación, pero los pinos tenderán a valores cercanos a cero, debido a que tendrán que acceder al aporte de la napa o a suprimir la percolación para mantener sus tasas de ETr. El reemplazo histórico de matorrales por pinos dentro de la cuenca (correspondiente a 7.751 ha) en los tres escenarios analizados, arrojaron montos de 15 a 19 millones de m³ año⁻¹ adicionales de agua perdida hacia la atmósfera debido a la ETr y entre 14 a 18 millones m³ año⁻¹ de disminución del agua percolada. Frente al desafío del país para optar hacia la carbono neutralidad, se espera que las plantaciones sigan expandiéndose, pero los resultados reportados en este estudio y la escasez de agua que se vive en esta zona imponen desafíos que deberían ir enfocados hacia una planificación territorial que permita garantizar el desarrollo sostenible al que se ha comprometido Chile.

Palabras clave: matorral espinoso, plantaciones exóticas, HYDRUS-1D, consumo de agua, seguridad hídrica.

ABSTRACT

The continuous expansion of exotic pine plantations has generated the replacement of native vegetation such as thorny shrubland, this could have consequences in the hydrological cycle of the areas where this land cover change occurs. The objective of this research was to evaluate the effect of the replacement of *Acacia caven* shrubland areas by *Pinus radiata* forest plantations on the historical and future actual evapotranspiration (ETa) and percolation rates in the Cauquenes river basin. The HYDRUS-1D model was implemented to quantify ETa and percolation under different past, present and future climate scenarios in three replications per coverage. The verifications of the water content in the soil and transpiration of the model were satisfactory, reaching values of $R^2 > 0.9$, $KGE > 0.85$ and $PBIAS < 10\%$, and of $R^2 > 0.7$, $KGE > 0.55$ and $PBIAS < 15\%$, respectively. The results indicate that from 1979 to 2019 there has been a decrease in the ETa rate and percolation in both covers, especially during the mega-drought period (2010-2019). The yearly differences between coverages showed that ETa was between 180 to 214 mm year⁻¹ more in pines than shrubland and that shrubland percolates between 184 to 237 mm year⁻¹ more than pines, regardless of the scenario analyzed. In future scenarios, both coverages will decrease their percolation, but pines will tend to values close to zero, because they will have to access to water table or suppress percolation to maintain their ETa rates. The historical replacement of shrubland by pine trees within the basin (corresponding to 7,751 ha) in the three temporal scenarios analyzed, yielded amounts of 15 to 19 million m³ year⁻¹ additional of water lost to the atmosphere due to ETa and between 14 to 18 million m³ year⁻¹ decrease in percolated water. In view of the country's challenge to opt for carbon neutrality, it is expected that plantations will continue to expand, but the results reported in this study and the scarcity of water that exists in this area impose challenges that should be focused on territorial planning to ensure the sustainable development to which Chile is committed.

Keywords: thorny shrubland, exotic plantations, HYDRUS-1D, water consumption, water security.

MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los impactos globales del cambio de uso/cobertura de suelo (CUCS) modifican los aspectos centrales del funcionamiento del sistema Tierra (DeFries et al., 2004; Hassan et al., 2005), pudiendo cambiar las características del sistema climático, con consecuencias sobre el clima local y global (IPCC, 2000). El cambio de cobertura de suelo modifica los atributos biofísicos de la superficie terrestre; por otra parte, el cambio de uso de suelo es la alteración que se realiza sobre los suelos con propósitos humanos, pudiendo conllevar un cambio de cobertura de suelo (Turner et al., 1990; Lambin et al., 1999). Son múltiples las consecuencias del CUCS, desde la pérdida de diversidad biótica (Sala et al., 2000), degradación de los suelos (Trimble y Crosson, 2000), cambios en los balances de energía y agua (Pielke et al., 2002; Foley et al., 2003), cambio en los servicios ecosistémicos (Lara et al., 2009), hasta mayor vulnerabilidad de los lugares y personas a perturbaciones climáticas, económicas o sociopolíticas (Turner et al., 2003; Kasperson y Kasperson, 2012).

El funcionamiento del sistema terrestre está compuesto de múltiples interacciones entre el suelo, el clima, la atmósfera y las coberturas de suelo, los que suceden a distintas escalas espaciales y temporales: el microclima cercano al suelo o el clima local, el clima regional y el clima global (Kabat et al., 2004). En cuanto al tiempo, existen interacciones de minutos a semanas, de meses a años y a más de un centenar de años (Pielke et al., 1998). Sin importar la escala espacial o temporal, la cobertura del suelo tiene un control biofísico de las propiedades físicas de la superficie de la Tierra, determinado en gran medida por la fisiología y la estructura de la vegetación (Pielke y Avissar, 1990; Sellers, 1992).

A escala regional, los impactos del CUCS sobre la radiación superficial, la hidrología de superficie y el balance de energía son complejos, con efectos difíciles de generalizar ya que dependen de la estación, el clima y las condiciones del suelo. Salazar et al. (2016) analizaron el efecto del CUCS en la región Sudamericana a través de la modelación de las interacciones vegetación-clima en cuatro biomas, uno de ellos es el Matorral chileno. Sus principales hallazgos fueron que la deforestación histórica ha influido en la partición de la energía superficial en forma de calor sensible (H) y latente (LE), sobre todo en la estación seca, con aumentos del calor sensible, mientras que en la estación húmeda hay una disminución en la relación de Bowen (H/LE) debido a que energía se va a la atmósfera mayormente como LE, pero ese flujo de agua proviene en mayor proporción de la evaporación del suelo que de la transpiración de las coberturas (fotosíntesis), corroborado por la disminución en los flujos de CO₂ en las áreas que ha habido cambio de cobertura del matorral. Además, las mayores pérdidas como flujo de LE, genera que las tasas de salida del agua en el suelo sean más rápidas hacia la atmósfera. Adicionalmente, estos autores mencionan la disminución de la infiltración de agua en el suelo, causando menores reservas totales de agua, siendo más notorio en la estación seca. Finalmente, concluyen que la deforestación del matorral aumenta la sequedad de la región, siendo muy importante en zonas semiáridas, por lo que el cambio de la vegetación natural hace a estas áreas más sensibles a la desertificación debido a cambios en el ciclo hidrológico, aumentos en la temperatura de superficie, disminución en el contenido de agua en el suelo y en la humedad atmosférica. Los autores sugieren que el manejo del matorral podría ser un factor clave para atenuar o mejorar los efectos locales del cambio climático, sin embargo, hay pocas investigaciones en estos ecosistemas.

Cambio de cobertura/uso de suelo y el balance hídrico

La proporción de las precipitaciones que llegan al suelo y la cantidad de agua que queda disponible para las plantas dependen del régimen de precipitaciones, de las características del suelo y de la configuración de la cubierta vegetal. Cuando se foresta una cubierta herbácea o se cambia una cobertura, se modifican el balance hídrico y la distribución espacial y temporal del contenido de agua en el suelo (Knoche, 2005), generando cambios en los montos de agua destinados a la evapotranspiración y percolación (Ward y Trimble, 2004; Thanapakpawin et al., 2006; Zimmermann et al., 2006).

Los bosques pueden interceptar la precipitación y reintegrarla a la atmósfera rápidamente por medio del proceso de evapotranspiración (Grimm y Fassbender, 1981). Dicha agua interceptada puede redistribuirse a través del follaje, escurrir por los troncos o ser evaporada desde las hojas (Crockford y Richardson, 1990). Adicionalmente, las especies arbóreas poseen un sistema radical que es capaz de explorar el suelo a mayores profundidades, en comparación a otras especies, y utilizar esta fuente para el proceso de evapotranspiración (Lee, 1980). Por otra parte, al aumentar la riqueza de la vegetación disminuye la escorrentía superficial, dado los diversos estratos vegetacionales que interceptan la precipitación y aportan hojarasca en superficie, pero el resultado final sobre el balance hídrico depende de las condiciones climáticas de cada zona (Maetens et al., 2012).

Hay autores que sugieren que la expansión de las plantaciones forestales impacta negativamente sobre los recursos hídricos al disminuir el agua disponible (Putuhena y Cordery, 2000; Farley et al., 2005). Las consecuencias de establecer estas plantaciones se hacen más relevantes debido a que son sistemas intensivos, con altas densidades de árboles, constituidas por una sola especie, y que además son de rápido crecimiento y de rotaciones breves (Prado, 2015). Oyarzún y Huber (1999) han demostrado una disminución acelerada de las reservas de agua del suelo en plantaciones jóvenes de pino y eucaliptus, a medida que los árboles crecen. Esto es concordante con lo estimado en el trabajo de Vertessy et al. (2001), donde se demuestra una reducción acelerada del rendimiento hídrico en cuencas con plantaciones de eucaliptus.

Oyarzún et al. (2005) analizaron las diferencias en el rendimiento hídrico de dos coberturas vegetales la Región de Los Lagos, concluyendo que hay una reducción significativa en el rendimiento hídrico de una cuenca con *Pinus radiata* comparada a una cuenca dominada por bosque nativo. Lara et al. (2009) estudiaron el efecto del manejo forestal sobre el caudal en dos cuencas hidrográficas en los Andes Valdivianos, obteniendo que los coeficientes de escorrentía (flujo total / precipitación total) en la estación de verano se correlacionaron positivamente con la cubierta forestal nativa en la cuenca; al contrario, encontraron una correlación negativa entre los coeficientes de escorrentía y la cobertura de *Eucalyptus spp.* y plantaciones de *Pinus radiata*. Además, estimaron un aumento promedio de 14,1% en el caudal total del verano por cada 10% de aumento en la cobertura del bosque nativo de la cuenca. Farley et al. (2005) hicieron una recopilación de los efectos de la forestación con especies de pinos y eucaliptus en el rendimiento de agua, señalando que la escorrentía anual se redujo en promedio en un 44% y 31% cuando se forestaron pastizales y matorrales, respectivamente. Little et al. (2009) señalan que en la cuenca de Cauquenes (CQA) y Purapel

(PPN) se produjo un cambio en el régimen hidrológico en respuesta a la cobertura forestal y al cambio de uso de suelo, estimando una disminución en la escorrentía de 13,1 a 7,5 mm / verano para PPN y de 7,3 a 5 mm / verano para CQA, para el período de 1991-2000 en comparación a los años 1981-1990.

Plantaciones forestales y la perspectiva a futuro en Chile

Las plantaciones forestales son a nivel mundial mayoritariamente de la especie *Pinus radiata* (Mead, 2013). En Chile, la superficie de bosque al año 2011 abarcaba 17,2 millones de hectáreas del territorio nacional, siendo equivalente a un 22,9% del área total. De este territorio, 2,8 millones de hectáreas están utilizadas en plantaciones forestales, siendo las especies dominantes *Pinus radiata* en un 68% y *Eucalyptus spp.* en un 28% (CONAF, 2013). La ubicación en el país de estas plantaciones es principalmente en la zona centro-sur, desde la Región del Maule hasta la Región de la Araucanía (INFOR, 2017). Sin embargo, la superficie actual es el resultado de una transformación gradual en conjunto con la actividad agrícola, las cuales han producido un importante cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo. Lara et al. (2012) señalan que los principales cambios de la cobertura vegetal en la zona centro-sur de Chile entre los años 1550 y 2007 fueron debido al establecimiento de la agricultura en la depresión intermedia y a la expansión de las plantaciones forestales. Si bien existen algunos casos de restauración de la vegetación nativa (Petitpas et al., 2016), la tendencia general, particularmente en el secano costero de Chile central, es a la pérdida de bosque nativo y su reemplazo por otros usos productivos (Miranda et al., 2017). Uribe et al. (2020) señalan que antes de 1960 ya había un 12% del área con plantaciones forestales en la Cordillera de Costa entre las regiones del Maule y del Biobío y que desde 1975 comenzaron a aumentar rápidamente, llegando a cubrir un 37% en 2014, mientras que las áreas de bosque nativo decrecieron de un 30 a 13% y los suelos agrícolas-ganaderos de un 39 a 13% para el mismo periodo.

Maule es una de las regiones que presenta la mayor disminución de bosque nativo, permaneciendo solo un 22% de la cobertura boscosa original. Las principales coberturas dominantes eran bosque nativo, pradera y matorral. Al año 2007, un 40% de la superficie de la región estaba cubierta por el sector agrícola y forestal (Lara et al., 2012). En la cuenca de Cauquenes en el Arrayán Little et al. (2009) muestran que las plantaciones forestales han aumentado de un 20 a un 42%, mientras que las áreas con matorral han disminuido de 65 a 33% y las de bosque nativo decrecieron de un 9 a 8% entre los años 1990 al 2000.

En este contexto de constantes cambios de cobertura que ha vivido la zona, la política forestal 2015-2035 propone la incorporación de pequeños y medianos agricultores en esta actividad productiva (CONAF, 2016). Dichos propietarios son en general dueños de pequeños campos cubiertos de matorral y praderas; sin embargo, los planes de desarrollo forestal se han establecido sin mayores evaluaciones de los impactos en los recursos hídricos. Adicionalmente Chile se ha impuesto la meta de carbono neutralidad al año 2050, y entre las medidas para lograr dicho objetivo está aumentar la superficie arbórea con plantaciones forestales y bosque nativo (NDC, 2020).

Por otra parte, en las regiones de clima Mediterráneo, como lo es la zona central de Chile, las proyecciones indican futuros más secos, con aumentos en las temperaturas y disminución en las precipitaciones (Giorgi y Lionello, 2008; Polade et al., 2014; Mariotti et al., 2015). Ya se ha visto esto en la zona central, por ejemplo, el verano 2016-2017 se posicionó como el más cálido del que se posea registro (Vicencio et al., 2017). Falvey y Garreaud (2009) indican que en prácticamente todo el Valle Central existe una tendencia al aumento de temperatura de $0,25^{\circ}\text{C}$ por década. Por su parte las precipitaciones han tenido una disminución de aproximadamente un 4% por década entre 1979 y 2008 (Boisier et al., 2016) y los eventos de sequía han afectado fuertemente a la zona central, con una secuencia ininterrumpida de años secos en el periodo 2010-2015, que ha llevado a déficits anuales de lluvia que van del 25 al 45 % (Garreaud et al., 2017). Además, se prevé una disminución del 40% de la escorrentía a fines del siglo en la zona bajo escenarios de cambio climático RCP8.5 (Bozkurt et al., 2018). Recientemente Galleguillos et al. (2021) mostraron el efecto del CUCS y cambio climático en la cuenca del río Cauquenes a través de simulaciones con un modelo a escala de cuenca, demostrando que la forestación con pinos intensificará la reducción del rendimiento hídrico, al ver disminuido el caudal medio entre un 23 a 46% al año 2050. Sin embargo, no existen estudios a escala local que vean los efectos del CUCS de suelo debido a las plantaciones forestales y el cambio climático en los componentes del balance hídrico como la evapotranspiración real y la percolación.

En base a todos los antecedentes presentados, es que se hace necesario evaluar el efecto combinado del cambio de uso/cobertura de suelo junto con el efecto del cambio climático sobre el consumo de agua de las coberturas vegetales a escala local y su impacto en el territorio.

HIPÓTESIS

La constante expansión de las plantaciones forestales de pino cubriendo áreas que estaban dominadas por matorral espinoso generan una disminución de la disponibilidad hídrica en cuencas pluviales de clima mediterráneo al modificar las tasas de evapotranspiración real y percolación.

Predicciones:

- El cambio de uso/cobertura de suelo, al reemplazar matorrales por plantaciones de pinos, generarán aumentos en la evapotranspiración real y disminución de la percolación afectando la seguridad hídrica de la cuenca.
- Frente a escenarios futuros de cambio climático, el reemplazo del matorral espinoso por plantaciones forestales de pino generará mayor escasez de agua en la cuenca, al aumentar la tasa de evapotranspiración real y disminuir la percolación para la recarga de acuíferos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio de uso/cobertura de suelo en la evapotranspiración real y la percolación histórica y futura en matorrales de *Acacia caven* y en plantaciones forestales de *Pinus radiata* en la cuenca del río Cauquenes de la Región del Maule.

Objetivos específicos

- I. Implementar el modelo de transferencias hídricas HYDRUS-1D en matorrales de *Acacia caven* y en plantaciones forestales de *Pinus radiata*.
- II. Analizar la evapotranspiración real y la percolación histórica en los sitios de matorrales de *Acacia caven* y en plantaciones forestales de *Pinus radiata*.
- III. Evaluar el efecto del cambio climático en la evapotranspiración real y la percolación de matorrales de *Acacia caven* y en plantaciones forestales de *Pinus radiata*.
- IV. Evaluar el efecto del cambio de uso/cobertura de suelo en la evapotranspiración real y la percolación que afectan la seguridad hídrica de la cuenca de río Cauquenes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del río de Cauquenes, entre los 35°41' y los 36°17' de latitud Sur, en las regiones del Maule y Ñuble pertenecientes a la zona centro-sur de Chile. Se establecieron seis parcelas experimentales: tres en matorral espinoso (*Acacia caven*) y tres en plantaciones forestales de *Pinus radiata* (Figura 1).

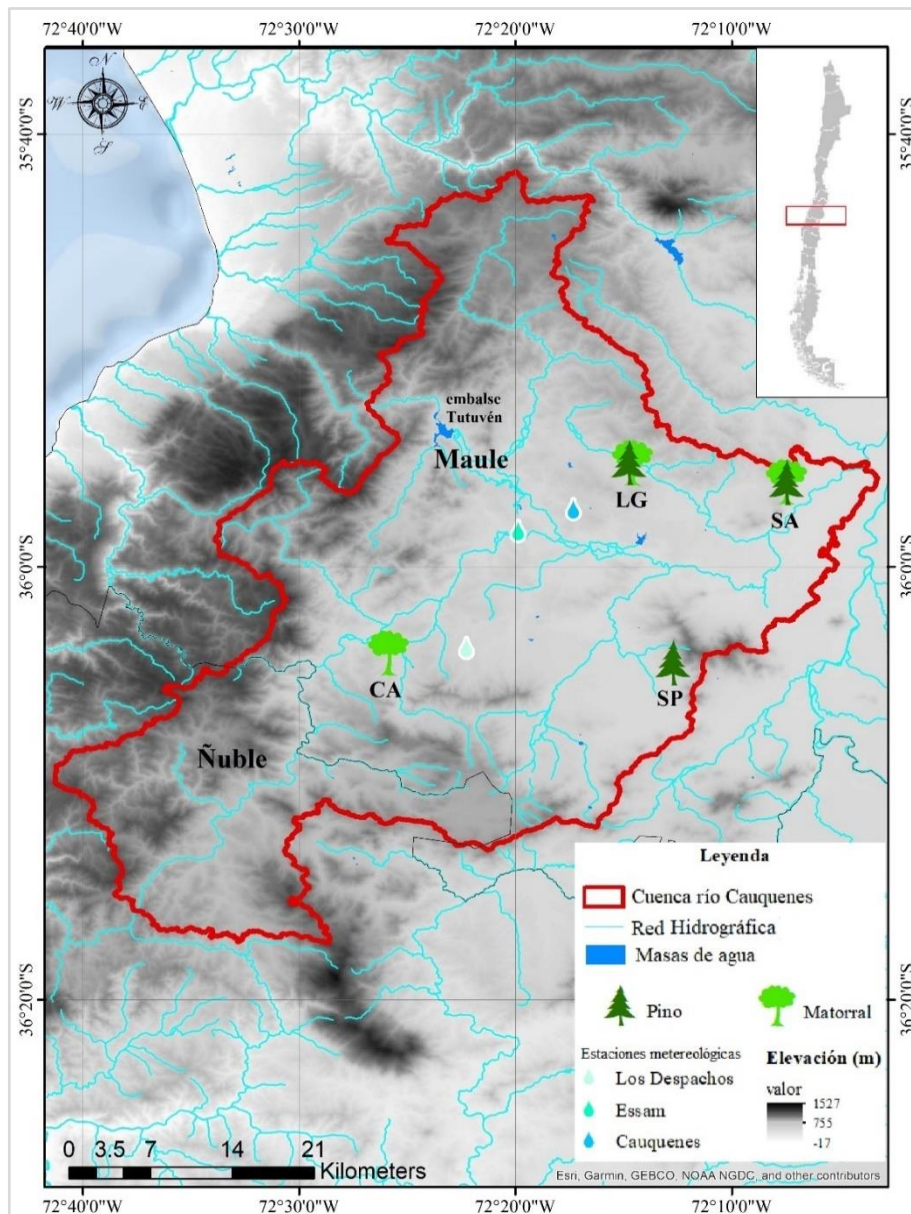


Figura 1. Mapa del área de estudio, con los sitios y estaciones meteorológicas utilizadas.

En el Cuadro 1 se muestra la información general de las estaciones meteorológicas usadas, mientras que en el Cuadro 2 se detalla la edad, densidad, altura y ubicación aproximada de las formaciones vegetacional estudiadas, como también los sensores que midieron repetidamente en cada cobertura y sitio de estudio. En la Figura 2 se muestran fotografías de cada uno de los sitios de estudio.

Cuadro 1. Datos generales y ubicación de las estaciones meteorológicas usadas en el estudio.

| Estación meteorológica | Propietario | Latitud | Longitud | Altitud (m) |
|------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Cauquenes | INIA ¹ | -35,956111° | -72,289999° | 162 |
| Essam | DMC ² | -35,972221° | -72,332499° | 150 |
| Los Despachos | INIA ¹ | -36,062222° | -72,371388° | 167 |

¹INIA: Instituto de Investigaciones Agropecuarias; ²DMC: Dirección Meteorológica de Chile.

Cuadro 2. Edad, densidad, altura, ubicación y sensores usados en cada cobertura y sitio de estudio.

| | Sitio y sigla | Edad ¹ | Densidad ² (ind. ha ⁻¹) | Altura ³ (m) | Latitud longitud | Altitud (m) | Sensores ⁴ |
|----------|---------------------|-------------------|---|----------------------------|----------------------|----------------|-------------------------------|
| Matorral | La Granja (LG) | +20 | 130 | 3,7 | -35,920° -72,243° | 153 | Enviroscan, Diviner |
| | Carmen Alto (CA) | +20 | 310 | 2,2 | -36,066° -72,431° | 171 | Diviner |
| | San Agustín (SA) | +20 | 270 | 3,4 | -35,934° -72,124° | 175 | Enviroscan, Flujo de savia |
| Pino | La Granja (LG) | 7-8 | 1350 | 9,3 | -35,919° -72,245° | 156 | Enviroscan |
| | San Pedro (SP) | 13-14 | 1200 | 22,4 | -36,073° -72,211° | 185 | Diviner |
| | San Agustín (SA) | 10-11 | 900 | 22,3 | -35,934° -72,124° | 176 | Enviroscan, Flujo de savia |

¹La edad se estimó a través de análisis de imágenes históricas de Google Earth. En el caso de matorrales, la edad es aproximada, ya que en la serie histórica estos ya estaban en su condición actual desde que hay registros en la plataforma (aprox. desde el año 2000).

²La densidad promedio (individuos ha⁻¹) se estimó con parcelas de muestreo de biomasa pertenecientes al mismo proyecto Fondecyt.

³La altura promedio de las coberturas en los sitios de estudios se midió con un hipsómetro electrónico modelo Vertex IV 360.

⁴Sensores de medición del contenido de agua en el suelo continuo (Enviroscan) y discreto (Diviner) (ver detalles en la sección 2.4.1 de materiales y métodos). Sensor de flujo de savia detallado en la sección 2.6.1 de materiales y métodos.

El clima de la zona es según la clasificación climática de Köppen-Geiger del tipo es Csb, es decir, Mediterráneo de lluvia invernal (Beck et al., 2018). En base a los datos de la estación Cauquenes, la precipitación media anual entre 1979 a 2009 fue de 700 mm, concentradas en los meses de otoño-invierno, las temperaturas máximas, media y mínima anual fueron de 21,36, 14,68 y 8 °C respectivamente y la ETo media anual fue 1001 mm. Sin embargo, durante los años 2010 a 2019 se vivió en la zona central una sequía prolongada, decreciendo los montos de precipitación a 526 mm, las temperaturas variaron a 21,96°C la máxima, 14,37°C la media y 6,78°C la mínima (Anexo 1), mientras que la ETo de este periodo fue de 1069 mm. En los años que se realizaron las mediciones para el presente estudio (2018 y 2019) los montos de precipitación fueron aún más bajos que la media del periodo, con montos de 485 y 420 mm respectivamente.

En cuanto a la vegetación, se presenta el matorral espinoso que es una formación vegetacional compuesta principalmente por la especie leñosa *Acacia caven* y hierbas anuales, que se ubican entre las latitudes 30° y 36° S de la parte no irrigada de la zona central mediterránea de Chile (Ovalle et al., 2006). El actual Espinal es una condición disclimática que ha quedado después de extensos procesos de degradación a las formaciones autóctonas que había en la zona (Armesto y Pickett, 1985, Fierro et al., 1998) como el bosque espinoso mediterráneo interior de *Acacia caven* y *Lithrea caustica* y el bosque esclerófilo mediterráneo interior de *Lithrea caustica* y *Peumus boldus* (Luebert y Pliscoff, 2006) (Anexo 2). Los principales usos del Espinal son para la fabricación de carbón y alimentación de ganado (Fierro et al., 1998).

En relación al contexto geológico, en la cuenca se pueden encontrar materiales de distintos periodos, desde el Carbonífero temprano de la era del Paleozoico con rocas metamórficas como pizarras, filitas y metaareniscas, continuando por áreas con rocas del tipo ígneas intrusivas como granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas del periodo Pérmico a Carbonífero de la era del Paleozoico, hasta depósitos sedimentarios más recientes originados en el periodo Cuaternario de la era Cenozoica (SERNAGEOMIN, 2003) (Anexo 3).

Por su parte, la geomorfología de la zona se determina por una de las tres macro formas del relieve de Chile, originadas por la Cordillera de la Costa y por las terrazas remanente que generó el río Maule. En el sector confluyen dos formaciones de la Cordillera de la Costa, una conformada por rocas graníticas que son la continuación del batolito granítico del norte y otra por rocas metamórficas, que constituyen el comienzo del basamento que sigue hacia el sur (Bravo, 2001; Luzio et al., 2010; Martínez, 2004). La meteorización de las rocas que hay en la Cordillera de la Costa ha generado suelos residuales, en zonas de altas pendientes, sensibles a la erosión hídrica (CIREN, 1997). A gran parte de los suelos asociados a la Cordillera de la Costa se le ha asignado capacidades de uso VI y VII, por lo que muchos de ellos se encuentran cubiertos con plantaciones de pinos (*Pinus radiata*) y eucaliptus (*Eucaliptus sp*). Por otra parte, los suelos originados por valles de sedimentación poseen capacidad de uso I, II y III, pudiendo destinarlos a la actividad agrícola (Luzio et al., 2010; MINVU, 2012).

Con la excepción de los suelos formados en valles de sedimentación, el área presenta principalmente tres Asociaciones: Cauquenes, Pocilla y Constitución. Todos son Alfisoles, formados *in situ*, a partir de roca granítica en el caso de Cauquenes y de roca metamórfica en los otros dos casos. También, en menor proporción de la cuenca se puede observar la Asociación Treguaco, que es el único Inceptisol del área formado *in situ* y la Serie Maule, que es de orden Alfisol y del tipo sedimentario (CIREN, 1997). Luzio et al. (2010) menciona que la diferencia morfológica más destacable entre los suelos de origen granítico con los de origen metamórfico es el color, ya que estos últimos se vuelven notablemente más rojos, en el matiz 2.5YR. Además, la meteorización de la roca metamórfica hace que en el perfil se presenten gravas cuarcíticas distribuidas irregularmente en los perfiles de suelo. En el Anexo 4 se presentan las principales características de cada Asociación/Serie de suelo de la cuenca.

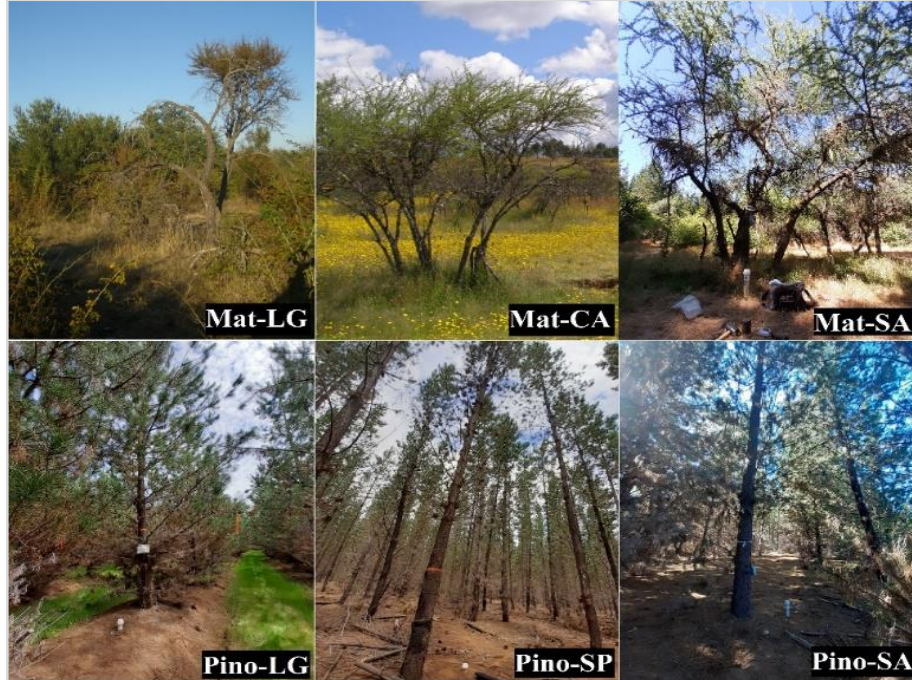


Figura 2. Fotografías de los sitios de matorral (superior) y de los sitios de pinos (inferior).

I. Implementación del modelo de transferencias hídricas para estimar el consumo de agua de cada cobertura

1. Modelación de la evapotranspiración

Para modelar el balance hídrico del suelo y poder estimar la evapotranspiración real y percolación, se utilizó HYDRUS-1D (Simunek y van Genuchten, 2008; Simunek et al., 2013). El modelo resuelve numéricamente la ecuación de Richards, que es la función estándar para simulaciones del movimiento del agua unidimensional en medios porosos insaturados, parcialmente saturados o totalmente saturados (Diamantopoulos et al., 2012; Simunek et al., 2003). La ecuación modificada de Richards para flujo de agua se describe en la ecuación 1:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} \right) + 1 \right] - S(h) \quad (\text{ec.1})$$

Donde, h es la presión de agua (cm), θ es el contenido volumétrico de agua en el suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), t es el tiempo (horas), z es la coordenada vertical (cm), S es el consumo del sumidero ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{día}^{-1}$) que representa la absorción de agua por las raíces de las plantas (transpiración) y $K(h)$ es la función de conductividad hidráulica insaturada (cm hora^{-1}).

El término de sumidero $S(h)$ se presenta en la ecuación 2 y es definido como el volumen de agua extraído de un volumen unitario de suelo por unidad de tiempo, debido a la absorción de agua por la planta (Feddes et al., 1978), donde S_p es la tasa de absorción potencial de cultivo y $\alpha(h)$ es la función de respuesta al estrés hídrico.

$$S(h)=\alpha(h)S_p \quad (\text{ec.2})$$

La Figura 3 muestra la función de $\alpha(h)$ según el modelo S-shaped propuesto por van Genuchten (1987), el cual explica cómo se reduce la absorción de agua por parte de la planta ($\alpha(h)$) en función de la presión de agua en el suelo (h). Los parámetros empíricos del modelo son h_{50} , que es la presión de agua en el suelo a la cual ocurre la reducción del 50% de la absorción de las raíces y el exponente p . Si bien la función S-shaped es más simple que el otro modelo disponible en HYDRUS para la respuesta al estrés hídrico de la planta (Feddes et al., 1978), ya que no considera la reducción de la absorción de las raíces cuando se está cerca de saturación, se considera razonable su uso cuando los periodos de saturación en el suelo son cortos, como es en los sistemas de este estudio (van Genuchten, 1987). Los valores utilizados en los parámetros de la función fueron los propuestos por Grinevskii (2011) presentados en el Anexo 5.

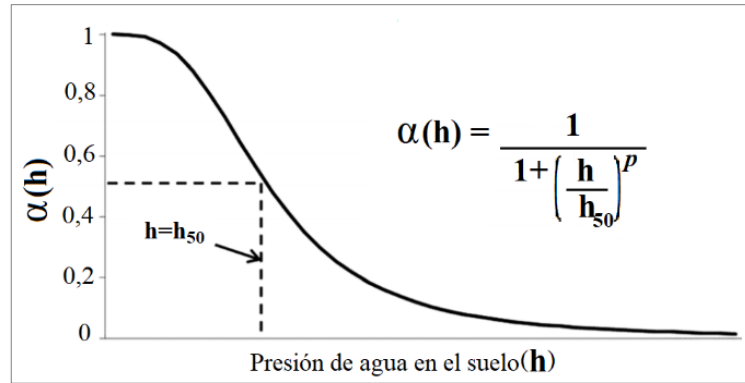


Figura 3. Esquema de la función S-shaped propuesta por van Genuchten (1987).

Las propiedades hidráulicas del suelo insaturado; $\theta(h)$ y $K(h)$ las deriva HYDRUS según el ajuste de van Genuchten (1980), descritas en las ecuaciones 3, 4 y 5:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad \text{con } m = \frac{1}{n}; n > 1 \quad (\text{ec.3})$$

$$K(h) = k_s Se^{\frac{1}{2}} (1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m)^2 \quad (\text{ec.4})$$

$$Se(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{ec.5})$$

Donde θ_r y θ_s es el contenido de agua residual y a saturación del suelo, respectivamente; K_s es la conductividad hidráulica saturada, Se es el contenido efectivo de agua, α es la presión de burbujeo y n índice de distribución del tamaño de poros. El exponente de Se es el parámetro de conectividad de poros en la función de conductividad hidráulica, y ha sido estimado en aproximadamente 0,5 debido a que es el promedio para muchos suelos (Mualem, 1976).

Para la estimación de parámetros de suelo (θ_r , θ_s , α , n , K_s), HYDRUS posee una opción para calibrar los parámetros a través de las mediciones *in situ* de la variable de interés. Para ello se usa una parte de las mediciones de contenido de agua de los sensores, luego el modelo internamente minimiza una función objetivo (Anexo 6) a través del método Levenberg-Marquardt, buscando reducir las diferencias entre el contenido observado y simulado (Simunek et al., 1999).

2. Procedimiento para estimar el consumo de agua

Para estimar el consumo de agua de matorrales y plantaciones de pino, se siguió el diagrama descrito en la Figura 4, que luego es detallado en las secciones siguientes. Primero se muestran una serie de parámetros y variables que se midieron o recopilamos como entrada para HYDRUS. Estos datos recopilados se dividen en datos de suelo, meteorológicos y de planta. Con esos datos de entrada se parametriza el modelo y se obtiene una simulación del contenido de agua en el suelo. Para verificar esa simulación se compara con otra entrada de datos que son las observaciones de contenido de agua obtenidas de los sensores FDR: Diviner y Enviroscan (los que fueron previamente calibrados, Apéndice 8). Si la comparación del contenido de agua en el suelo observado versus el simulado daba satisfactoria según las medidas de bondad de ajuste (Cuadro 4), entonces se prosiguió a obtener la evapotranspiración real y percolación del cultivo. En el caso contrario, se procedió a calibrar los parámetros de suelo para mejorar la simulación del modelo. Lo anterior se realizó en todos los sitios en estudio. Finalmente, se realizó un procedimiento de verificación independiente contra observaciones de transpiración obtenidas de sensores de flujo de savia de la marca PlantSensors (ver sección 2.6.1). Estas solo se realizaron en el sitio San Agustín para un sitio de matorral y un sitio de pino, ya que no se disponía de más equipos para medir en los otros sitios al momento de iniciar esta investigación. En la actualidad se han instalado más equipo de flujo de savia en otras repeticiones de pino y matorral para tener más puntos de verificación de la transpiración de dichas coberturas.

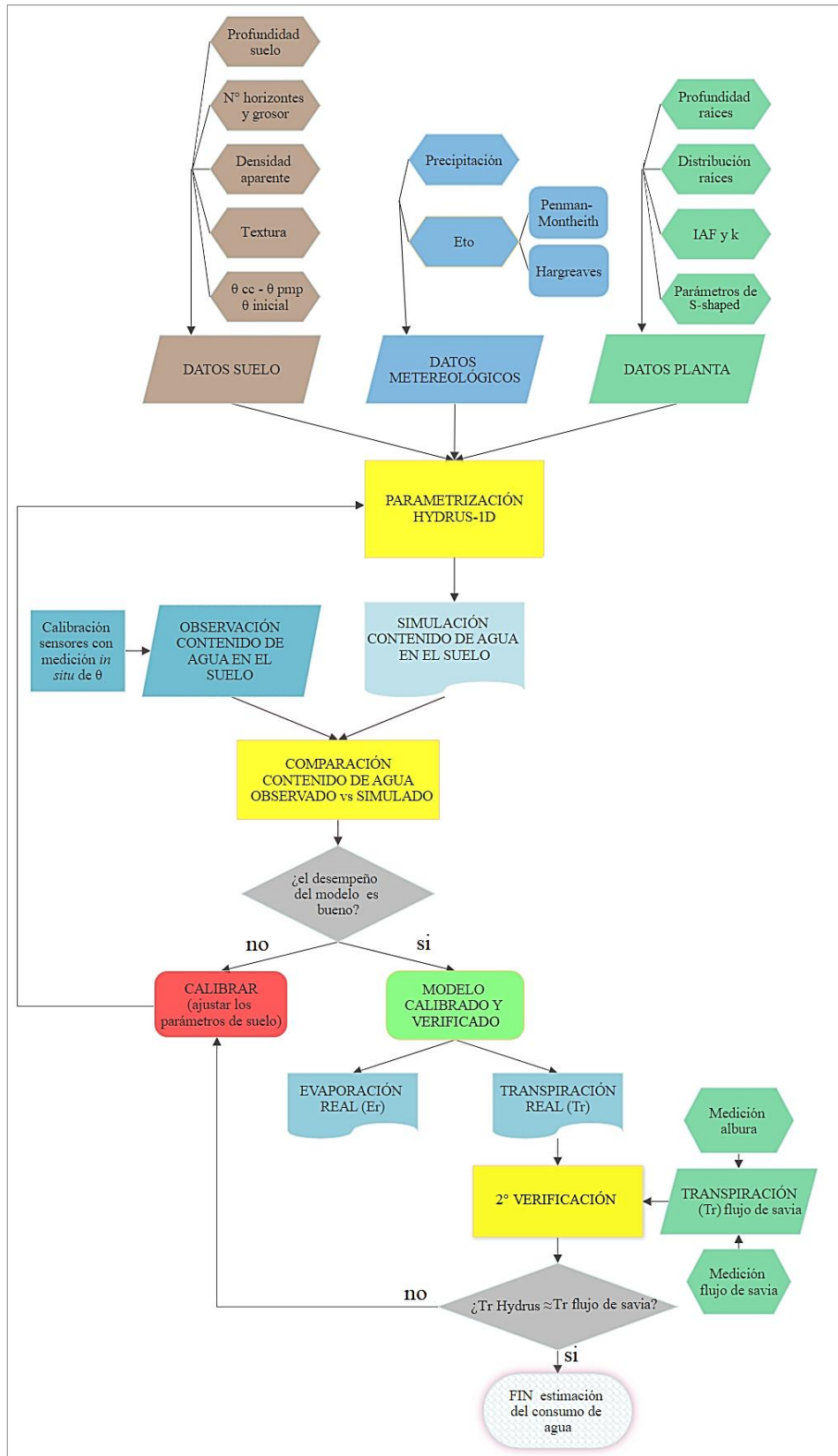


Figura 4. Diagrama de los pasos a seguir para estimar el consumo de agua de cada cobertura. (los detalles de cada procedimiento se describen en las secciones siguientes).

2.1. Datos de Suelo

2.1.1. Caracterización del suelo y análisis de laboratorio

Se realizaron las descripciones de los seis perfiles de suelo según Schoeneberger et al. (2012), en la cual se definieron horizontes genéticos y sus rasgos morfológicos. Además, se realizaron los siguientes análisis de laboratorio según Sandoval et al. (2012):

- Determinación de la densidad aparente por el método del cilindro, usando cilindros de 5,0 cm de altura y de 5,9 cm de diámetro.
- Determinación de la proporción de arcilla, limo y arena por el método del hidrómetro de Bouyoucos.
- Determinación de los contenidos de agua (θ) a los siguientes potenciales mátricos: -0,2, -6, -33, -100 y -1500 kPa a través del uso de la cama de arena, del plato y la olla a presión. Si bien para HYDRUS solo es necesario el contenido de agua a capacidad de campo (-33kPa) y punto de marchitez permanente (1500kPa), los otros puntos se usaron para construir la curva característica de cada horizonte y corroborar el correcto ajuste de los parámetros de van Genuchten.
- Determinación de la densidad real a través del método del picnómetro.

2.1.2. Estimación de los parámetros de van Genuchten y la conductividad hidráulica saturada

Para estimar los parámetros de retención de agua de van Genuchten (1980) y la conductividad hidráulica saturada, es decir θ_r , θ_s , n , α y K_s , se tomaron los datos medidos de densidad aparente, proporción de partículas en el suelo, el contenido de agua a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente y se ingresaron al software Rosetta DLL (Schaap et al., 2001), que es una biblioteca vinculada a HYDRUS que predice los parámetros mencionados.

Luego, se construyó la curva de retención de agua y se comparó con los datos de contenido de agua medidos a distintas presiones en laboratorio (-0,2, -6, -33, -100 y -1500 kPa). Si la curva estimada se ajustó a los puntos medidos, entonces se procedió con la modelación en HYDRUS; en el caso que el ajuste no fuese satisfactorio, se calibraron los parámetros con el programa RETC (van Genuchten et al., 1991) para mejorar el ajuste entre los datos observados en laboratorio y las curvas estimadas de retención de agua en el suelo.

2.2. Datos de la planta

2.2.1. Profundidad de raíces y su distribución

La profundidad de las raíces se definió con la descripción de los perfiles de suelo realizadas en la sección previamente descrita. En este punto es importante mencionar que la máxima profundidad observable era a la que llegaban las descripciones de las calicatas, que fueron hasta un máximo de 1,70 m. Es por lo que en los pinos se tuvo que inferir hasta dónde podría llegar la absorción de agua por parte de las raíces, especialmente en el sitio pino SA, donde había mediciones de flujo de savia, ya que los montos de transpiración de HYDRUS debían

ajustarse a los medidos con el equipo del flujo de savia. En el sitio pino LG las raíces crecían hasta los 110-120 cm debido a una capa posiblemente cementada con sílice (Apéndice 1), y las observaciones del sensor a los 1,60 m de profundidad no mostraban cambios importantes en el contenido de agua, por lo que se podía inferir que no había extracción por parte de las raíces. Por su parte, para el pino SP se definió una profundidad de raíces de 3 m, que es lo reportado en bibliografía para la especie cuando no hay limitaciones de suelo (Watson y O’Loughlin, 1990; Huber y Trecaman, 2000; CORMA, 2015).

Por otra parte, el factor de distribución de raíces que es necesario ingresar a HYDRUS para cada horizonte es un valor relativo, es decir, si al horizonte 1 se le asigna el valor de 1 y al horizonte 2 el valor de 10 significa que el horizonte 2 tiene 10 veces más raíces que el horizonte 1. Los valores asignados se realizaron en base a la abundancia de raíces observadas en la descripción de los perfiles, como también en base a los contenidos de agua observados por los sensores; si un horizonte no tenía cambios a lo largo de la temporada en su contenido de agua, entonces se le asignó un valor que tendiera a cero (Apéndice 3).

2.2.2. Estimación de los parámetros IAF y k

Para estimar el índice de área foliar (IAF) y el coeficiente de extinción (k) se utilizó el “CI-110 Plant Canopy Imager” (Bio-Science, 2018). El equipo captura imágenes de ojo de pez a 150° del dosel, las cuales son divididas en segmentos cenitales y azimutales, para luego calcular los parámetros de interés. El método para estimar IAF de manera indirecta es el “Gap Fraction” o Fracción de espacios del dosel (Norman y Campbell, 1989), la cual indica qué parte del cielo es visible desde debajo del dosel de la planta. En el Anexo 7 se describe en detalle el cálculo interno que realiza el equipo para encontrar el IAF y el k .

El instrumento contiene una lente PENTAX autonivelante que permite que las imágenes se recojan mirando verticalmente hacia arriba desde debajo del dosel, a aproximadamente 1 m del suelo. El muestreo se realizó a la planta que tenía el sensor de contenido de agua. Se tomaron cuatro mediciones: por delante, atrás y a ambos lados de la planta. En la Figura 5 se muestra un par de imágenes tomadas en el sitio La Granja, la imagen a la izquierda corresponde al matorral y la imagen de la derecha al pino.

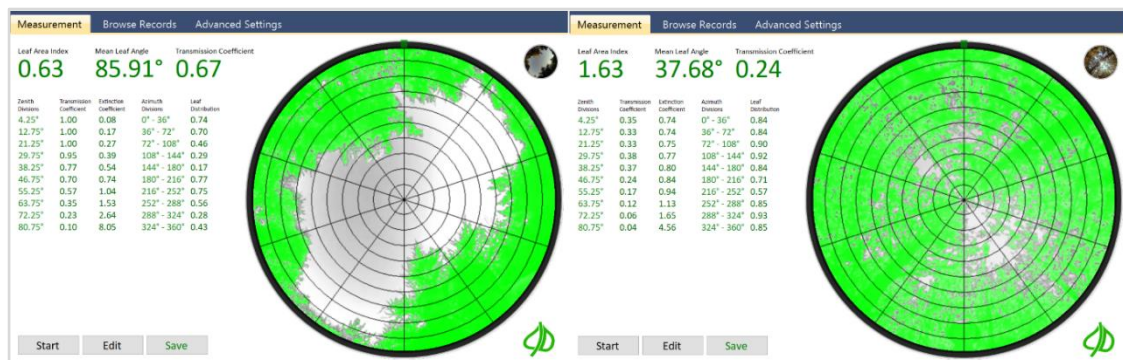


Figura 5. Imagen procesada del software CI-110 para matorral (izquierda) y pino (derecha) en el sitio La Granja.

2.3. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos se obtuvieron de las estaciones Cauquenes-INIA y Los Despachos a través de la página web Agrometeorología perteneciente al INIA (<https://agrometeorologia.cl>). Se recopilaron los inputs necesarios para HYDRUS, que son las entradas al sistema (precipitación) y las salidas (ETo). Para la precipitación, se consideró un monto de interceptación, para ello se usó el único modelo integrado en HYDRUS para esta variable, que fue propuesto por Von Hoyningen-Hüne (1983) y Braden (1985). El modelo se presenta en la ecuación 6:

$$I = \alpha \cdot IAF \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{b \cdot Pp}{\alpha \cdot IAF}} \right) \quad (\text{ec.6})$$

Donde I es la interceptación (cm d^{-1}), α es un coeficiente empírico (cm d^{-1}), IAF es el índice de área foliar, b es la fracción de suelo cubierto ($\approx IAF/3.0$) y Pp es la precipitación (cm d^{-1}). El modelo representa una función asintótica, alcanzando el valor máximo en $\alpha \cdot IAF$. El valor de α se asumió de $0,25$ (cm d^{-1}) según lo sugerido por Simunek et al. (2013). Dicho valor también fue usado por Adane et al. (2018) en su estudio en sectores con *Pinus ponderosa*.

Para estimar la ETo, se usó el modelo de Penman-Monteith (Smith et al., 1991), por lo que se descargaron las siguientes variables: radiación solar, temperatura máxima y mínima, humedad relativa y velocidad del viento a escala horaria. Luego, para separar la evaporación y la transpiración potencial el modelo usa el IAF para separar estas dos componentes, usando la ley de Beer, que separa los componentes de la radiación solar vía interceptación de la canopia como lo describen las siguientes ecuaciones:

$$T_p = ET_p (1 - e^{-k \cdot IAF}) = ET_p \cdot SCF \quad (\text{ec.7})$$

$$E_p = E_p (e^{-k \cdot IAF}) = ET_p (1 - SCF) \quad (\text{ec.8})$$

Donde ET_p , E_p , T_p son evapotranspiración, evaporación y transpiración potenciales, SCF es la fracción de suelo cubierta, k es el coeficiente de extinción y IAF es el índice de área foliar.

2.4. Calibración y verificación de HYDRUS-1D con los datos de contenido de agua del suelo

2.4.1. Sensores de contenido de agua

En cada repetición se instalaron tubos de acceso para medir con Diviner 2000 o con Enviroscan, que son sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry), que permiten medir periódicamente el contenido de agua en el suelo. El Diviner consiste en un sistema portátil de medición indirecta del agua en el sistema, que consta de una sonda y un datalogger de mano, que permite obtener los contenidos de agua volumétrico a intervalos de $0,1$ m, pudiendo acceder hasta los $1,6$ m. Por su parte el Enviroscan, posee de 4 a 5 sensores que

miden continuamente el contenido de agua a diferentes profundidades (por ej. 30, 60, 90 y 120 cm). El principio del FDR como su explicación se presentan en el Anexo 8.

2.4.2. Calibración de los sensores FDR

Los datos obtenidos de los sensores de contenido de agua se calibraron en base al contenido real que arrojaba el laboratorio. Para la calibración se tomaron cuatro muestras de cilindros para cada profundidad censada por el Diviner o el Enviroscan. Se buscó obtener una variabilidad de contenidos de agua para formar una curva de calibración, por lo que al menos hay 3 puntos medidos en distintas condiciones de contenidos de agua en cada sitio analizado.

Las mediciones de calibración se iniciaron en septiembre del 2019 y finalizaron a fines de enero del 2020. Como en este periodo no hubo una precipitación que hiciera llegar el suelo a un contenido de agua similar a los registrados por los sensores en los inviernos del 2018 y 2019, lo que se hizo fue simular una precipitación con una lámina de agua adherida al perfil de suelo en donde mide el sensor. A través del uso de un cilindro infiltrómetro, se agregó una lámina de agua, y se esperó lo necesario hasta que se homogeneizara el agua infiltrada en el horizonte a medir.

2.4.3. Calibración y verificación de HYDRUS-1D

Con la parametrización de HYDRUS-1D en los pasos previos, se modeló el contenido de agua en el suelo y estos valores se compararon con los datos obtenidos de los sensores. En algunos sitios se calibraron los parámetros obtenidos de Rosetta, ya que las curvas de contenido de agua en el suelo simulado versus el observado no se ajustaban adecuadamente según las medidas de bondad de ajuste. Al calibrar, se usó una parte de las mediciones de contenido de agua *in situ* y otra parte de los datos se usó para verificar el modelo luego de haber encontrado los nuevos parámetros. El periodo de calibración y verificación depende del sitio, ya que no en todos los sitios se comenzó en el mismo momento. Para determinar qué parámetro calibrar, se hizo un análisis de sensibilidad manual de cada uno de ellos, constatando qué tanto mejoraban las métricas estadísticas para alcanzar al menos el rango “Satisfactorio” propuesto en el Cuadro 4 (en especial para el NSE y KGE). A continuación, se mencionan las consideraciones que se tuvo en cada sitio:

Matorral La Granja: Los horizontes entre 85-124 cm y entre 124-170 cm presentaban similitudes en sus propiedades físicas, por lo que se prefirió hacer un promedio entre las características de estos y dejarlos con los mismos parámetros al inicio de la simulación en HYDRUS, ya que así mejoraba el ajuste entre las simulaciones y las observaciones. También se agregaron dos capas de 4 cm cada una al perfil de HYDRUS, las que representan unas intercalaciones delgadas con dominio de grava que se describe en el horizonte de los 19 a 60 cm (Apéndice 1). A través de la calibración inversa de HYDRUS se modificaron 4 parámetros para mejorar el ajuste de las simulaciones (Cuadro 5).

Matorral Carmen Alto: El primer horizonte descrito en el perfil es entre los 0-3 cm (Apéndice 1) pero éste no posee análisis de propiedades físicas debido a lo delgado de la capa, por ello se asumió que sus características son iguales a las del segundo horizonte (3-11 cm). Al igual que en el sitio anterior, debido a la similitud en las propiedades físicas de los horizontes 54-

95 cm y 95-130 cm, se prefirió hacer un promedio entre ambos y con eso estimar los parámetros de la curva de retención de agua. También se agregó en el modelo una transición de 4 cm entre el horizonte 11-27 cm y 27-54 cm, debido a que el aumento de arcilla entre uno y el otro era sobre el 20% y eso causaba que el modelo no convergiera. Se procedió de la misma manera entre los horizontes de 27-54 cm y 54-95, cm ya que el aumento de arcilla era sobre un 10%. Cabe destacar que la descripción de suelo indica que la nitidez del límite para ambos casos es claro, o sea que el cambio se da entre 2 a 5 cm entre un horizonte y el otro, por lo que la decisión tomada se condice con lo visto en el perfil. En este sitio no fue necesario utilizar la calibración inversa, ya que las simulaciones se ajustaban a lo observado de agua en el suelo.

Matorral San Agustín: El perfil de este sitio se caracteriza por tener altos porcentajes de arena de manera homogénea en todo el perfil (Apéndice 2), por lo que las simulaciones en HYDRUS no presentaron problemas para converger. Además, las simulaciones se ajustaron a lo visto por los sensores, por lo que no fue necesario recurrir a la calibración inversa.

Pino La Granja: Este sitio en un principio solo fue posible describirlo y analizarlo hasta los 110 cm, ya que bajo dicha profundidad se presenta una cementación que imposibilitó profundizar la calicata (Apéndice 1). Luego, debido a lo necesario de obtener las propiedades físicas bajo los 110 cm, se ingresó con barreno para al menos obtener los porcentajes de arcilla, limo y arena en profundidad, por ello en el Apéndice 2 no están los contenidos a capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los horizontes entre los 110 y 200 cm. Los parámetros calibrados inversamente fueron principalmente de los horizontes en profundidad que se caracterizaron con barreno.

Pino San Pedro: Este perfil considera cinco horizontes según la descripción de suelo, que llegó hasta los 140 cm (Apéndice 1). Sin embargo, se agregó un horizonte adicional en profundidad (140 a 300 cm) debido a que la extrapolación del 5° horizonte no concordaba con lo visto por el sensor de contenido de agua. Este último horizonte consideró los porcentajes de partículas similares a los que poseen los horizontes 3 y 4 (Apéndice 2). Los parámetros que se calibraron inversamente fueron las conductividades hidráulicas, ya que estas presentaron un mayor impacto en la mejora de las métricas estadísticas entre las simulaciones y las observaciones de contenido de agua en el suelo al hacer un análisis de sensibilidad manual.

Pino San Agustín: La descripción de suelo en este sitio llegó hasta los 160 cm (Apéndice 1), pero igualmente se obtuvieron los datos de textura en profundidad a través de barreno (Apéndice 2). El perfil en HYDRUS consideró siete horizontes, el último horizonte se extrapoló hasta los 340 cm, debido a que se obtuvo información de un estudio de resistividad en el sitio que constató la presencia de una napa freática desde los 340 cm en verano (Anexo 9), por lo que el suelo disponible para la exploración de las raíces sería hasta dicha profundidad.

2.5. Simulación a escala diaria

Para determinar la evapotranspiración real y percolación históricas y en los escenarios futuros, se modeló con HYDRUS-1D a escala diaria, corroborando que los ajustes del contenido de agua en el suelo observado y simulado dieran óptimos de acuerdo con las medidas de bondad de ajuste. Se usó la escala diaria porque históricamente las estaciones meteorológicas solo tienen registros diarios de las variables climáticas. Además, debido a que históricamente solo se tienen datos de temperatura máxima y mínima, se procedió a calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) con el método de Hargreaves señalado en la ecuación 9 (Hargreaves y Samani, 1985), ya que no se tienen los datos necesarios para calcular la ET_o a través del método Penman-Monteith. Posteriormente, se corrigieron los datos de ET_o Hargreaves a ET_o Penman-Monteith a través de la ecuación 10 obtenida de una regresión lineal que se construyó con los datos de los dos modelos para un periodo en donde se poseía la información para construir ambos modelos según lo sugerido por Allen et al. (2006), obteniéndose un R² de 0.92 (Apéndice 4).

$$ET_o = 0,0023 \cdot (T_{med} + 17,78) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (ec.9)$$

Donde T_{med} es el promedio de la temperatura máxima (T_{max}) y mínima (T_{min}) en grados Celsius y R_a es la radiación extraterrestre incidente en mm/día.

$$ET_o \text{ Penman-Monteith} = -0,38 + 0,86 \cdot ET_{\text{Hargreaves}} \quad (ec.10)$$

2.6. Datos de transpiración *in situ*

2.6.1. Verificación a través de la medición del flujo de savia

El sistema de flujo de savia de Granier (1985) de la marca PlantSensors (modelo PS-TDP8), es un sensor de disipación térmica o TDP, constituido por dos sondas idénticas de detección, cada una está constituida por un termopar de cobre fino y una bobina de calentamiento. El funcionamiento consiste en que la sonda superior se calienta a una potencia constante y la inferior no se calienta. Al aplicar una fuente de calor constante en la corriente de savia, se genera una disipación de calor a causa del movimiento de savia, que reduce la temperatura del sensor calentado, generándose una diferencia de temperatura (ΔT). El principio en el que se basa el sistema es que en condiciones de equilibrio térmico entre la sonda y el medio en el que está inserto (albura), con una densidad de flujo de savia constante, es posible asumir que la entrada de calor por el efecto Joule es igual a la cantidad de calor disipado por convección y conducción en las paredes de la sonda (Granier, 1985).

La ΔT entre las sondas está altamente relacionada con la densidad del flujo de savia y su relación es independiente de la especie arbórea en estudio o de la anatomía de la madera (Granier, 1985; Lu et al., 2004). La ΔT entre las dos sondas se registra en un data logger que guarda la información de todos los individuos conectados. Como el flujo de savia se ve afectado directamente por el déficit de presión de vapor y la radiación, estas son registradas en cada paso de tiempo a través de sensores acoplados al equipo. Con el registro de estas

variables se puede ver que el flujo de savia sea concordante con las variable climáticas a lo largo del día.

Para transformar las diferencias de temperatura a flujo de savia, primero es necesario aplicar la ecuación 11 de Granier:

$$Fd = 118,99 \cdot 10^{-6} \cdot ((\Delta T_{\text{máx}}/\Delta T) - 1)^{1,231} \quad (\text{ec.11})$$

donde Fd es la densidad de flujo de savia ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, m^3 de agua por m^2 de área de albura por segundo), $\Delta T_{\text{máx}}$ corresponde a la diferencia de temperatura cuando se detiene el movimiento de la savia y generalmente ocurre antes del amanecer o durante la noche y ΔT es la diferencia de temperatura registrada en un momento dado. Finalmente, el cálculo del flujo total de savia (F , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) se realiza por medio de la ecuación 12, donde SA es el área de albura (m^2) medida en la posición de la sonda calentada:

$$F = Fd \cdot SA \quad (\text{ec.12})$$

Como los métodos basados en el equilibrio térmico son sensibles a las condiciones ambientales del sitio de estudio (Lu et al., 2004), se tuvieron una serie de cuidados al momento de la instalación para minimizar interferencias térmicas en la medición, como la instalación de las sondas por el lado sur del árbol para disminuir los gradientes de radiación del sol, la aplicación de espuma de poliuretano sobre las sondas para aislarlas térmicamente y finalmente un envoltorio de film alveolar y papel aluminio en la sección del árbol intervenida.

2.6.2. Determinación del área de la albura

La albura es la banda exterior, clara, joven y activa de la madera que conduce agua (xilema activa), adyacente a la corteza. La albura se posiciona en los últimos anillos de crecimiento del árbol, producidos por el cambium vascular en el tallo de una planta (Roger, 2005). La sonda del flujo de savia debe estar inserta por completo en el xilema activo (albura). Para ello fue necesario determinar la profundidad de ésta en cada árbol en que se instaló la sonda. Para ello se tomó un núcleo incremental del tronco (Figura 6). Para identificar el área de xilema activo se debió tocar la muestra e identificar al tacto la zona húmeda que es por donde hay flujo en la planta. En el caso de *Acacia caven* no solo era la humedad, sino que también el color de la madera, en cambio en *Pinus radiata* el color no era un factor determinante. También se midió el diámetro del árbol a la altura del pecho, el grosor de la corteza y con esas mediciones se determinó el área de albura y luego se ingresó en la ecuación 12.

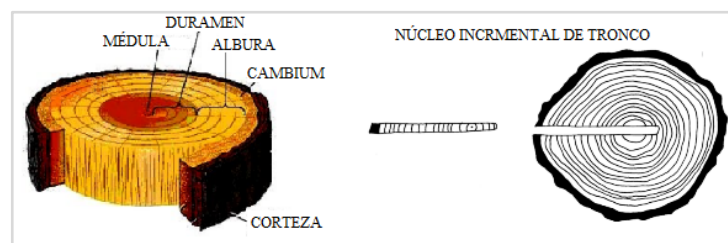


Figura 6. Esquema del corte transversal de un tronco y de un núcleo incremental.

El instrumento se instaló en el sitio de San Agustín midiendo paralelamente en cuatro árboles de *Pinus radiata* y en cuatro de *Acacia caven*. La medición se inició en diciembre 2018 hasta mayo del 2019. Sin embargo, no todo el periodo se pudo usar para verificar, ya que el equipo tuvo una falla eléctrica y no todos los sensores midieron en el periodo anteriormente señalado.

2.7. Corrección del consumo de matorrales

Debido a que los individuos de *Acacia caven* no cubren totalmente las áreas de matorral, a través del software QGIS se analizaron imágenes RGB tomadas con un UAV (Phantom IV) a 5 cm de resolución espacial en los tres sitios en estudio para saber cuánta área está cubierta por arbusto y así ponderar el consumo del área de matorral y de pradera. Por lo tanto, el consumo del área de matorral estará dado por la ecuación 13, donde *cob* es la proporción de arbustos de *Acacia caven* con respecto al área total de análisis. El área de análisis consideró aproximadamente 1 hectárea en cada sitio de estudio.

$$\text{Consumo}_{\text{matorral}} = \text{consumo}_{\text{Acacia caven}} \cdot \text{cob} + \text{consumo}_{\text{pasto}} \cdot (1 - \text{cob}) \quad (\text{ec.13})$$

El consumo de la pradera se simuló en HYDRUS asumiendo el mismo suelo descrito para los matorrales de espino, pero con una cobertura herbácea de 12 cm de altura, 30 cm de profundidad de raíces y de índice foliar variable. Para reconstruir la dinámica del índice foliar (*IAF*) a lo largo de un año, se obtuvieron los valores desde imágenes mensuales del satélite Sentinel 2, este posee el sensor MSI (Multispectral Instrument) que captura imágenes a una resolución espacial de 20 m (Weiss y Baret, 2016). La dinámica del *IAF* se reconstruyó con los datos disponibles entre los años 2017 al 2020.

II. Evapotranspiración real y percolación histórica y futura en los sitios de estudio

Para simular la evapotranspiración real y percolación/capilaridad histórica y futura a través de HYDRUS, se asumió que las coberturas seguirán en el estado actual de desarrollo en que fueron caracterizadas, por lo que solo se varió las condiciones climáticas en los distintos periodos de tiempo considerados.

1. Periodo histórico (1979-2019)

Los datos de precipitación históricos diarios se obtuvieron de la estación Essam de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) desde 1979 al 2019 (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/>), debido a que ésta tenía registros con menos ventanas de datos que la estación INIA-Cauquenes. A causa de que la estación Essam no posee registros de temperatura, no se podía estimar la ETo con ella, es por lo que se usaron los datos de CR2MET, que posee datos grillados de temperatura máxima y mínima diarias a una resolución aproximada 5 km para toda el área de estudio (<http://www.cr2.cl/datos->

[productos-grillados](#)). Para corroborar que los datos de este producto se ajustaran a lo registrado por las estaciones meteorológicas usadas en la cuenca, se procedió a estimar la ETo Hargreaves con los datos de CR2MET y con los datos que habían registrados en las estaciones de Los Despachos e INIA-Cauquenes entre los años 2010 a 2019, luego se hizo una correlación entre ambas, la cual resultó satisfactoria, con un $R^2=0,97$ (Apéndice 5).

Debido a que entre el 2010-2019 hubo un fuerte decrecimiento de las precipitaciones debido a la megasequía que afectó a la zona centro-sur de Chile (Garreaud et al., 2020), se hizo un análisis aparte de las evapotranspiración real y percolación para ese periodo.

2. Periodo futuro (2020-2046)

Los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima del 2020 al 2046 se obtuvieron del trabajo realizado en la cuenca del río Cauquenes por Galleguillos et al. (2021), que se basa en la utilización de Modelos de Circulación Global (MCG) con escenarios de altas emisiones (RCP8.5) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5), que tienen por objetivo simular el clima futuro y con ello generar escenarios climáticos. El procedimiento para estimar las variables climáticas en el futuro se basa en el método *delta* propuesto por Quilbé et al. (2008). Para mayores detalles del método consultar en el Anexo 10.

En el Cuadro 3 se presentan los cambios en la precipitación, temperatura máxima y mínima anuales esperada en los tres escenarios de cambio climático. En el Anexo 11 se muestran los mismos cambios, pero para cada mes del año.

Cuadro 3. Variación en la precipitación, temperatura máxima (T máx.) y mínima (T mín.) en los escenarios futuros.

| Escenario | Cambio en la precipitación anual (%) | Cambio en la T máx. anual (°) | Cambio en la T mín. anual (°) |
|-----------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Pesimista | ↓27,97 | ↑1,30 | ↑1,05 |
| Mediano | ↓11,80 | ↑1,20 | ↑0,83 |
| Optimista | ↑6,04 | ↑0,78 | ↑0,64 |

Para mostrar las diferencias entre el periodo de referencia (1979-2005) y el periodo futuro (2020-2046) se calculó la diferencia relativa de la evapotranspiración real y percolación anuales y estacionales con la ecuación 14 y 15.

$$\text{Diferencia relativa ETr \%} = \frac{\text{ETr}_{\text{futuro}} - \text{ETr}_{\text{referencia}}}{\text{ETr}_{\text{referencia}}} \cdot 100 \quad (\text{ec.14})$$

$$\text{Diferencia relativa Per \%} = \frac{\text{Per}_{\text{futuro}} - \text{Per}_{\text{referencia}}}{\text{Per}_{\text{referencia}}} \cdot 100 \quad (\text{ec.15})$$

III. Efecto del cambio de uso/cobertura de suelo sobre la evapotranspiración real y percolación de la cuenca

Para evaluar el efecto del cambio de uso/cobertura desde el matorral espinoso a las plantaciones de pino, se procedió a cuantificar las hectáreas que hay de la especie exótica en el área de estudio en donde debería haber matorral, como se muestra en la Figura 7. El mapa de cobertura usado fue el desarrollado por el Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas (LabMME), basado en una mejora del que fue publicado por Zhao et al. (2016) y los pisos vegetaciones potenciales fueron los descritos por Luebert y Pliscoff (2006).

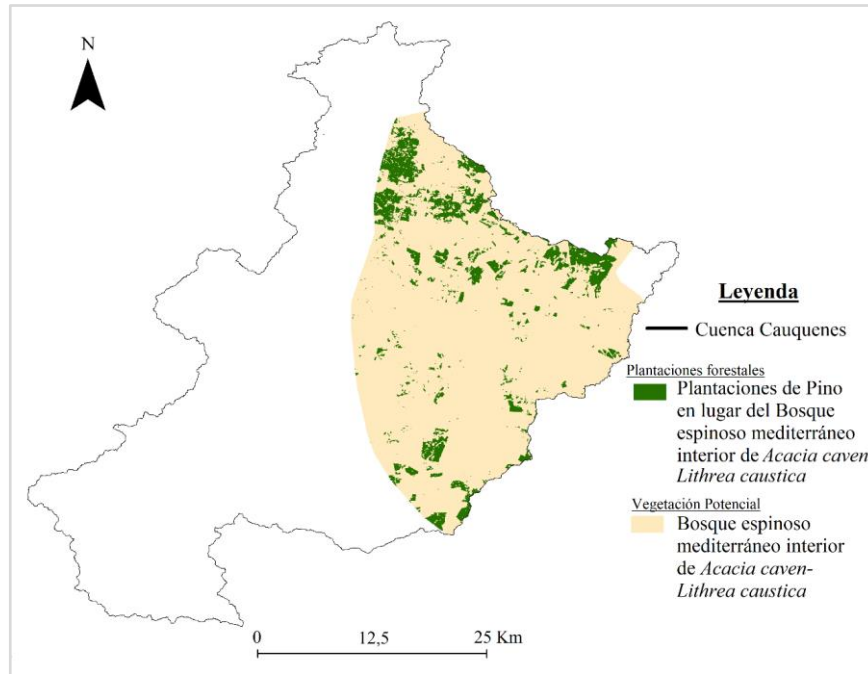


Figura 7. Mapa de las áreas cubiertas por plantaciones de pino donde debería haber matorral.

Luego, se calculó la diferencia en el volumen de agua (ΔV) como evapotranspiración real (ET_r) y percolación (Per) al tener pinos (p) en vez de matorral (m) en las áreas que originalmente eran bosque espinoso (ecuaciones 16 y 17).

$$\Delta V_{ET_r} = (ET_{r_p} \cdot A_p) - (ET_{r_m} \cdot A_p) \quad (\text{ec.16})$$

$$\Delta V_{Per} = (Per_p \cdot A_p) - (Per_m \cdot A_p) \quad (\text{ec.17})$$

Donde A_p son las hectáreas cubiertas por pinos en donde debería haber matorral. La diferencia de volumen debido a la evapotranspiración real y percolación adicional se expresó en $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ y también en estructuras de acumulación de agua, como los camiones aljibe (10.000 L) y en equivalentes al embalse Tutuvén (obra que se usa con fines agrícolas en la cuenca de Cauquenes, con una capacidad de 13.000.000 m^3 y una superficie potencial de regadío de 2200 ha, Figura 1), estas equivalencias se usaron para poder dimensionar los montos obtenidos.

Análisis estadístico

Para evaluar el desempeño del modelo, se confrontaron las simulaciones de contenido de agua de suelo y las observaciones de los sensores. Un procedimiento similar se realizó para analizar las transpiraciones estimadas con HYDRUS-1D y las medidas por el flujo de savia. Para el análisis estadístico se utilizaron: coeficiente de determinación (R^2); coeficiente de Nash-Sutcliffe o NSE; coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta o KGE; sesgo porcentual o PBIAS; error cuadrático medio o RMSE y el error cuadrático medio relativo o RRMSE (Bennett et al., 2013; Shelia et al., 2018, Zambrano-Bigiarini, 2020). En el Cuadro 4 se muestran las fórmulas de los estadísticos y su interpretación, donde O es el valor observado, S es el valor simulado, \hat{y}_i es el valor predicho por el modelo estadístico, \bar{O} es el promedio de los datos observados, \bar{S} es el promedio de los datos simulados, CV_o es el coeficiente de variación de los valores observados, CV_s es el coeficiente de variación de los valores simulados, r es el coeficiente de correlación de Pearson y N es el número de datos observados. Cabe mencionar que las métricas recomendadas para evaluar el desempeño del modelo, como la interpretación de los rangos donde el modelo es desde excelente a insatisfactorio, pueden cambiar de acuerdo al modelo a usar, el paso de tiempo configurado y la variable en estudio (Moriassi et al., 2012; Ritter et al., 2013; Moriassi et al., 2015), por ello la tabla elaborada se hizo en función de los trabajos de diferentes autores (Moriassi et al., 2007; Li et al., 2013; Seong et al., 2015; Hossain et al., 2019).

Cuadro 4. Métricas estadísticas con sus respectivas fórmulas e interpretaciones.

| Métrica | Fórmula | Rango variación | Ideal | Interpretación ¹ | | | |
|--------------|--|--------------------|-------|-----------------------------|----------------|-----------------|-------|
| | | | | E | B | S | I |
| R^2 | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$ | [0, 1] | 1 | >0,85 | >0,75 <0,85 | >0,6 <0,75 | <0,6 |
| NSE | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$ |]-∞, 1] | 1 | >0,75 | >0,65 <0,75 | >0,5 <0,65 | <0,5 |
| KGE | $1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{CV_s}{CV_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{S}}{\bar{O}} - 1\right)^2}$ |]-∞, 1] | 1 | >0,75 | >0,65 <0,75 | >0,5 <0,65 | <0,5 |
| $PBIAS$ % | $100 \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$ |]-∞, +∞[| 0 | < ±5 | > ±5 < ±10 | > ±10 < ±15 | > ±15 |
| $RMSE$ | $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$ | [0, +∞[| 0 | - | - | - | - |
| $RRMSE$ % | $100 \frac{RMSE}{\bar{O}}$ | [0, +∞[| 0 | <10 | >10 <20 | >20 <30 | >30 |

¹E: excelente, B: bueno, S: satisfactorio, I: insatisfactorio.

Para analizar las tendencias de la evapotranspiración real y percolación desde 1979 a 2019 se hizo un análisis de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), que es una prueba estadística no paramétrica para calcular la significancia de las tendencias de una serie de tiempo. Se presentan los valores del p-value para indicar la significancia de la tendencia y la pendiente de Sen (Sen, 1968) que indica cuantos milímetros por año ha crecido o decrecido la variable.

RESULTADOS

I. Implementación del modelo de transferencias hídricas

1. Datos de suelo para la derivación de los parámetros de van Genuchten y conductividad hidráulica saturada

Las descripciones de las calicatas de cada uno de los sitios se presentan en el Apéndice 1, mientras que los resultados de los análisis realizados por el Laboratorio de Física de Suelo se muestran en el Apéndice 2. Los datos de los análisis mencionados se ingresaron a Rosetta para derivar los parámetros de van Genuchten que permiten construir las curvas características de cada horizonte (Apéndice 6), como también la conductividad hidráulica saturada. Dichos parámetros están resumidos en el Cuadro 5, separados por sitio de estudio.

Para poder entender los valores de los parámetros que están en el Cuadro 5 se hará una breve descripción de los contenidos de partículas predominantes en cada sitio (Apéndice 2). Los lugares con mayores contenidos de arenas fueron San Agustín (SA) y La Granja (LG), en el matorral SA hay más de un 78% de arena y en pino SA sobre un 68%, mientras que en los sitios de uso en LG se presentan mayores diferencias entre ellos, en el pino la arena es mayor al 75% de manera homogénea hasta los 135 cm, pero en el matorral se presentan horizontes contrastantes, que pasan de un 90% de arena a un 55%, con intercalaciones de grava de cuarzo que muestran un perfil con cambios abruptos entre sus horizontes. Por otra parte, los sitios matorral Carmen Alto (CA) y pino San Pedro (SP) poseen mayores contenidos de arcilla en profundidad, siendo especialmente notable en el primer sitio mencionado, ya que en superficie tiene 16% de arcilla y aumenta a un 60% en profundidad (Apéndice 2).

Las diferencias en los parámetros del Cuadro 5 responden a las variaciones en las texturas entre sitios y dentro del mismo perfil. A modo general, se puede decir que los valores de K_s , n y α tienden a ser menores en texturas finas y mayores en texturas más gruesas (Anexo 12). En esa dirección se puede observar que los valores de n y α son más bajos en pino SP y matorral CA. En este último se ve la disminución del parámetro n a medida que se avanza en profundidad, ya que como se indicó previamente, se produce un aumento de arcilla al ir profundizando en el perfil. En matorral LG se ven los mayores valores de n , debido a que posee horizontes con un 90% de arena. En pino LG llama la atención el menor valor de n en el último horizonte, pero esto responde al cambio en la textura que hay bajo los 135 cm, tornándose más fino (Apéndice 2). Pino SA posee valores de n menos dispersos que los otros sitios, concordante con su textura, en tanto en matorral SA solo destaca el n más alto de la primera profundidad que, aunque tiene valores similares de arena en todo el perfil, la menor densidad de ese horizonte ajusta el valor del parámetro. Por su parte, las K_s más altas están en matorral LG y las más bajas en matorral CA que, como ya se mencionó, responden principalmente a las texturas de estos perfiles.

Cuadro 5. Parámetros de van Genuchten y conductividades hidráulicas de cada horizonte (H) definido en HYDRUS para cada sitio de estudio.

| Sitio | H | Profundidad cm | θ_r cm ³ cm ⁻³ | θ_s cm ³ cm ⁻³ | α cm ⁻¹ | n - | K_s cm h ⁻¹ |
|-------------------------|----------------|-------------------|--|--|------------------------------|------------------|-----------------------------|
| Matorral La Granja | 1 | 0-9 | 0,042 | 0,496 | 0,043 | 1,32 | 6,3 |
| | 2 | 9-19 | 0,040 | 0,394 | 0,057 | <i>1,95/1,64</i> | 22,2 |
| | 3 | 19-60 | 0,049 | 0,325 | 0,054 | 2,08 | 25,9 |
| | I ¹ | 41-45; 51-54 | 0,020 | 0,150 | 0,056 | 2,10 | 100 |
| | 4 | 60-85 | 0,048 | 0,422 | 0,023 | 1,28 | <i>0,8/0,4</i> |
| | 5 | 85-124 | 0,05 | 0,352 | 0,041 | 1,39 | <i>2,1/4,0</i> |
| | 6 | 124-200 | 0,05 | 0,352 | <i>0,041/0,026</i> | 1,39 | 2,1 |
| Matorral Carmen Alto | 1 | 0-11 | 0,043 | 0,393 | 0,013 | 1,32 | 0,8 |
| | 2 | 11-26 | 0,051 | 0,394 | 0,018 | 1,31 | 1,0 |
| | T ² | 26-29 | 0,077 | 0,385 | 0,031 | 1,12 | 0,4 |
| | 3 | 29-53 | 0,109 | 0,381 | 0,036 | 1,18 | 0,1 |
| | T ² | 53-56 | 0,112 | 0,382 | 0,05 | 1,12 | 0,1 |
| | 4 | 56-200 | 0,115 | 0,381 | 0,052 | 1,15 | 0,6 |
| Matorral San Agustín | 1 | 0-5 | 0,032 | 0,447 | 0,059 | 1,75 | 12,8 |
| | 2 | 5-12 | 0,033 | 0,402 | 0,06 | 1,57 | 8,9 |
| | 3 | 12-38 | 0,031 | 0,366 | 0,058 | 1,59 | 7,3 |
| | 4 | 38-90 | 0,031 | 0,352 | 0,056 | 1,56 | 6,2 |
| | 5 | 90-110 | 0,030 | 0,32 | 0,057 | 1,68 | 9,4 |
| | 6 | 110-200 | 0,026 | 0,315 | 0,056 | 1,54 | 8,1 |
| Pino La Granja | 1 | 0-19 | 0,037 | 0,281 | 0,058 | 1,51 | 8,9 |
| | 2 | 19-37 | 0,027 | 0,354 | 0,053 | 1,51 | 4,8 |
| | 3 | 37-55 | 0,026 | 0,382 | 0,055 | 1,50 | 7,6 |
| | 4 | 55-85 | 0,026 | <i>0,372/0,2</i> | 0,055 | 1,63 | 8,8 |
| | 5 | 85-110 | 0,021 | 0,328 | 0,055 | 1,79 | 10,6 |
| | 6 | 110-135 | 0,026 | 0,250 | <i>0,057/0,016</i> | 1,55 | <i>5,1/1,0</i> |
| | 7 | 135-200 | 0,097 | 0,400 | <i>0,026/0,011</i> | <i>1,27/1,13</i> | 0,1 |
| Pino San Pedro | 1 | 0-20 | 0,048 | 0,370 | 0,032 | 1,32 | <i>1,3/3,3</i> |
| | 2 | 20-35 | 0,100 | 0,409 | 0,047 | 1,19 | <i>2,9/14,5</i> |
| | 3 | 35-67 | 0,079 | 0,395 | 0,032 | 1,12 | <i>0,5/27,8</i> |
| | 4 | 67-95 | 0,080 | 0,380 | 0,028 | 1,12 | 0,6 |
| | 5 | 95-140 | 0,068 | 0,370 | 0,035 | 1,13 | 0,2 |
| | 6 | 140-300 | 0,075 | 0,401 | 0,022 | 1,14 | <i>0,61/7,7</i> |
| Pino San Agustín | 1 | 0-9 | 0,029 | 0,520 | 0,090 | 1,27 | 45,6 |
| | 2 | 9-32 | 0,030 | 0,370 | 0,051 | 1,33 | 7,3 |
| | 3 | 32-59 | 0,044 | 0,340 | 0,045 | 1,46 | 3,1 |
| | 4 | 59-91 | 0,052 | 0,337 | 0,041 | 1,33 | 0,9 |
| | 5 | 91-160 | 0,045 | 0,340 | 0,034 | 1,30 | 1,6 |
| | 6 | 160-190 | 0,048 | 0,333 | 0,052 | 1,48 | 2,4 |
| | 7 | 190-340 | 0,048 | 0,337 | 0,050 | 1,46 | 3,0 |

¹I: intercalaciones; ²T: horizonte de transición,

Los parámetros de los horizontes en donde se tuvo que aplicar calibración inversa se muestran en cursiva, señalándose el valor del parámetro antes de calibrar y el valor posterior a la calibración en HYDRUS (*antes de calibrar/ después de calibrar*).

2. Parámetros de cobertura foliar (*IAF* y *k*)

En el Cuadro 6 se presenta el índice de área foliar (*IAF*) y el coeficiente de extinción (*k*) medidos en cada sitio de estudio. Los valores de *IAF* son similares para los matorrales LG y CA, mientras que el matorral SA presenta el mayor valor para la cobertura de matorral. En los sitios de plantación de pino, los valores están ordenados crecientemente según su *IAF*, siendo el sitio LG el que presenta el valor más bajo y SA el más alto.

Cuadro 6. Promedio del índice de área foliar (*IAF*) y del coeficiente de extinción (*k*).

| | Matorral LG | Matorral CA | Matorral SA | Pino LG | Pino SP | Pino SA |
|------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|
| <i>IAF</i> | 0,70 | 0,70 | 1,40 | 1,70 | 2,00 | 2,90 |
| <i>k</i> | 0,55 | 0,50 | 0,55 | 0,65 | 0,62 | 0,55 |

Para el consumo del matorral en las simulaciones diarias de HYDRUS tanto históricas como futuras que se mostrarán en la sección II, se hizo previamente la ponderación del área cubierta por individuos de *Acacia caven* y el área cubierta de pradera. En el Apéndice 7 está la dinámica del *IAF* en las praderas de los diferentes sitios. En cuanto al porcentaje de cobertura, el análisis de las imágenes de dron (Anexo 13) arrojaron un 49% en matorral LG, 23,7% en matorral CA y 59,7% en matorral SA.

3. Calibración y verificación de HYDRUS-1D con los contenidos de agua del suelo

En esta sección se muestran las curvas de contenido de agua en el suelo simuladas y observadas en los distintos nodos (profundidades) de cada sitio de estudio (figuras 8 y 9), como también la ponderación de estos nodos por la profundidad representada, es decir, el almacenamiento del perfil completo (Figura 10). Los datos observados fueron previamente corregidos con las curvas de calibración de los sensores para cada sitio (Apéndice 8).

Los periodos de tiempo en que se midió con los sensores son distintos, ya que su instalación no fue simultánea; esto es posible observarlo en las figuras 8 y 9, donde se ven los periodos entre el inicio y el fin de las mediciones del sensor. En general, la última medición considerada fue en abril del 2020, pero en el sitio SA, tanto en matorral como en pino fue en enero del 2020. Los nodos de observación de los sensores se trataron de situar en los distintos horizontes de los perfiles descritos; en el caso de los sensores Diviner, se tienen mediciones cada 10 cm, por lo que la información de los otros nodos que no están graficados en las figuras 8 y 9 se pueden encontrar en el Apéndice 9. Las sondas usadas en los sitios matorral SA y pino LG poseían cinco nodos de observación, mientras que la sonda usada en el sitio matorral LG y pino SA poseían cuatro. Cabe señalar que el sitio matorral LG hubo mediciones con los dos sensores usados en este estudio, primeramente, con Diviner, luego durante unos meses se usó sonda Enviroscan (para el periodo de calibración) y finalmente se retomaron las mediciones con Diviner. Las mediciones con Diviner se realizaron cada 1 a 2 meses, pero en 2019, debido a problemas con la disponibilidad del equipo de medición (hurto de la consola del equipo), no se pudo tener mediciones durante algunos meses. En el caso de la sonda Enviroscan, se presentaron periodos sin datos debido a problemas técnicos del equipo, como es el caso de pino LG, que tiene 2 ventanas sin datos de febrero a marzo del

2019 y del 2020; por su parte, la sonda de pino SA tuvo una ventana desde mayo a junio del 2019 y otra ventana solo del primer nodo entre febrero a marzo del 2019.

Las medidas de bondad de ajuste están asociadas a cada nodo en las figuras 8 y 9. En el caso de los sitios que tuvieron calibración inversa, se presentan las métricas tanto para el periodo de calibración como de verificación. En general se observan valores de NSE y KGE $>0,5$, que muestran un desempeño satisfactorio del modelo, con algunas excepciones, como lo es el último nodo de observación de matorral CA, que presenta un valor de NSE de 0,47 y el último nodo de pino LG en el periodo de verificación, con un NSE=0,14 pero con un KGE de 0,73. En cuanto al RMSE, los valores oscilan entre 0 a 0,04 cm^3 agua por cm^3 de suelo en cada nodo, lo que demuestra bajos valores de error.

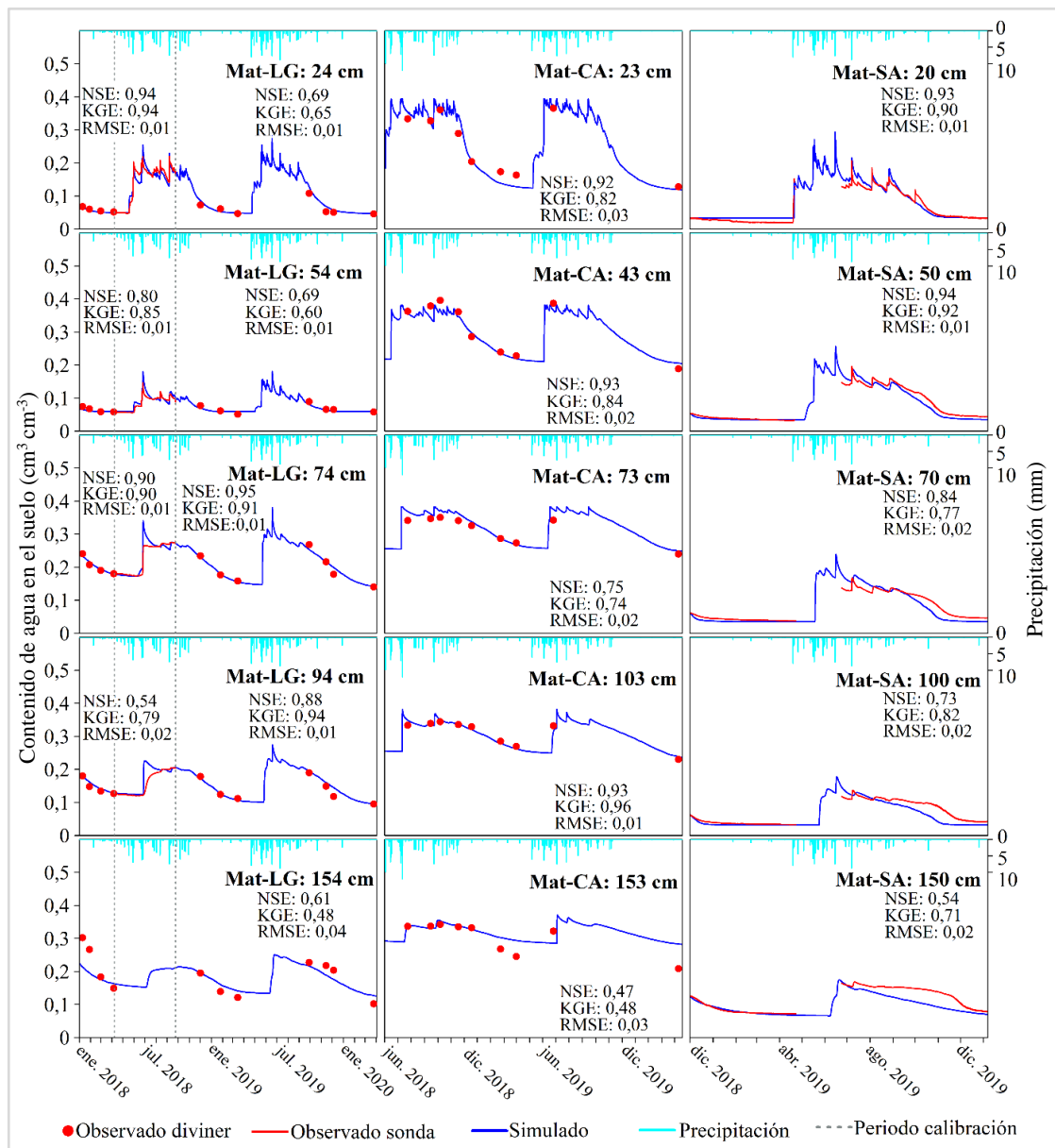


Figura 8. Curvas de observación de los sensores y simulación de HYDRUS para cada nodo en los perfiles de suelo de los sitios de matorrales.

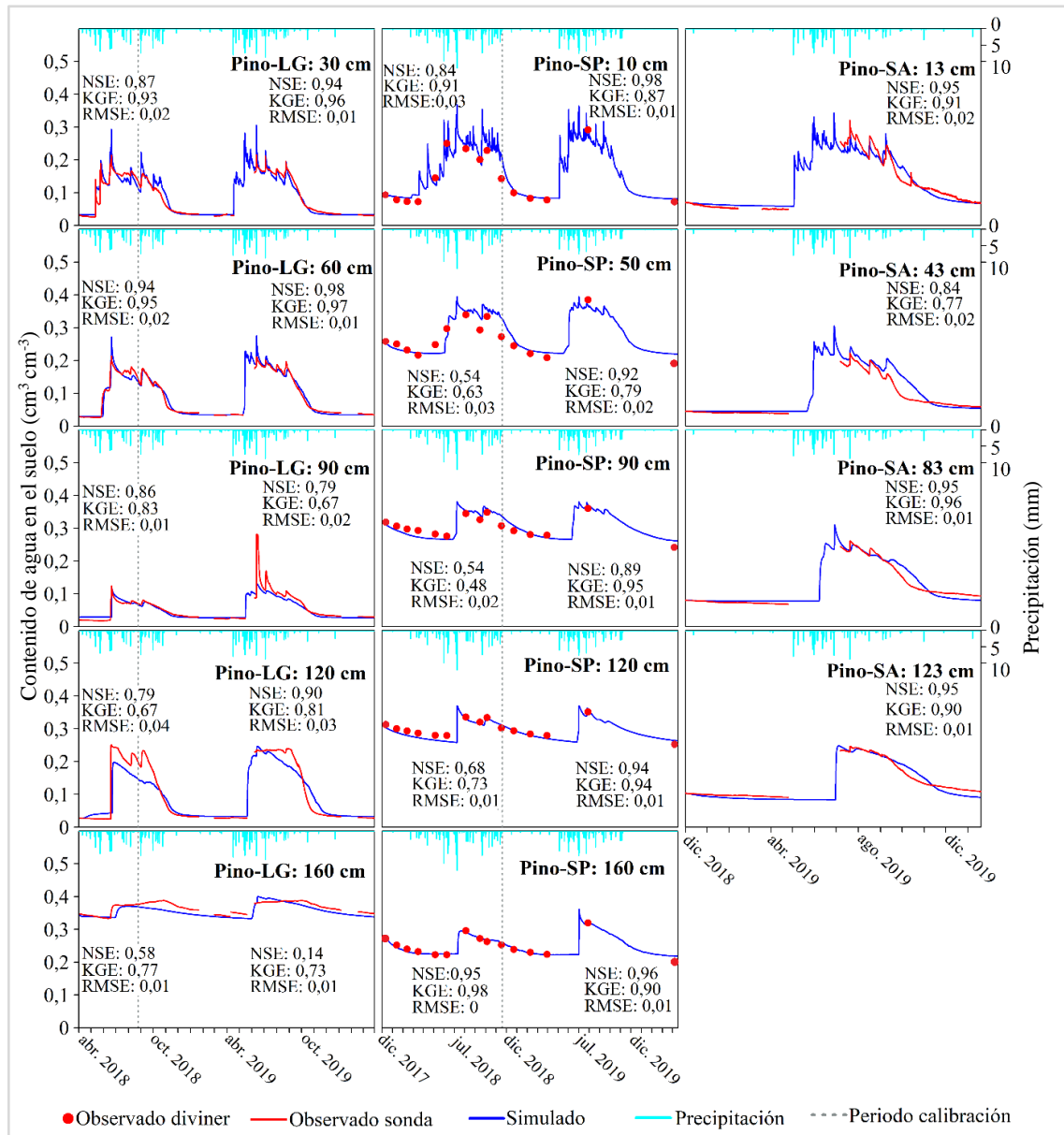


Figura 9. Curvas de observación de los sensores y simulación de HYDRUS para cada nodo en los perfiles de suelo de los sitios de plantación de pino.

El almacenamiento de agua en el suelo simulado y observado se presenta en la Figura 10, tanto para pinos como matorrales. Los valores de bondad de ajuste en este caso muestran que los valores más bajos de NSE o KGE que poseían algunos nodos de las figuras 8 y 9 aquí se difuminan, al integrar todos los nodos por la respectiva profundidad que representan, obteniéndose valores de $NSE \geq 0,75$, $KGE > 0,70$, $R^2 > 0,85$, que corresponden a un desempeño de bueno a excelente del modelo a nivel del perfil de suelo. Las métricas de error como el RMSE arrojan valores entre 10 a 29 mm de discrepancia del agua en el suelo entre lo observado y lo simulado, el RRMSE oscila entre 5 a 18% y el sesgo expresado en el PBIAS $< |\pm 10|$ demuestran errores bajos según los rangos expuestos en el Cuadro 4.

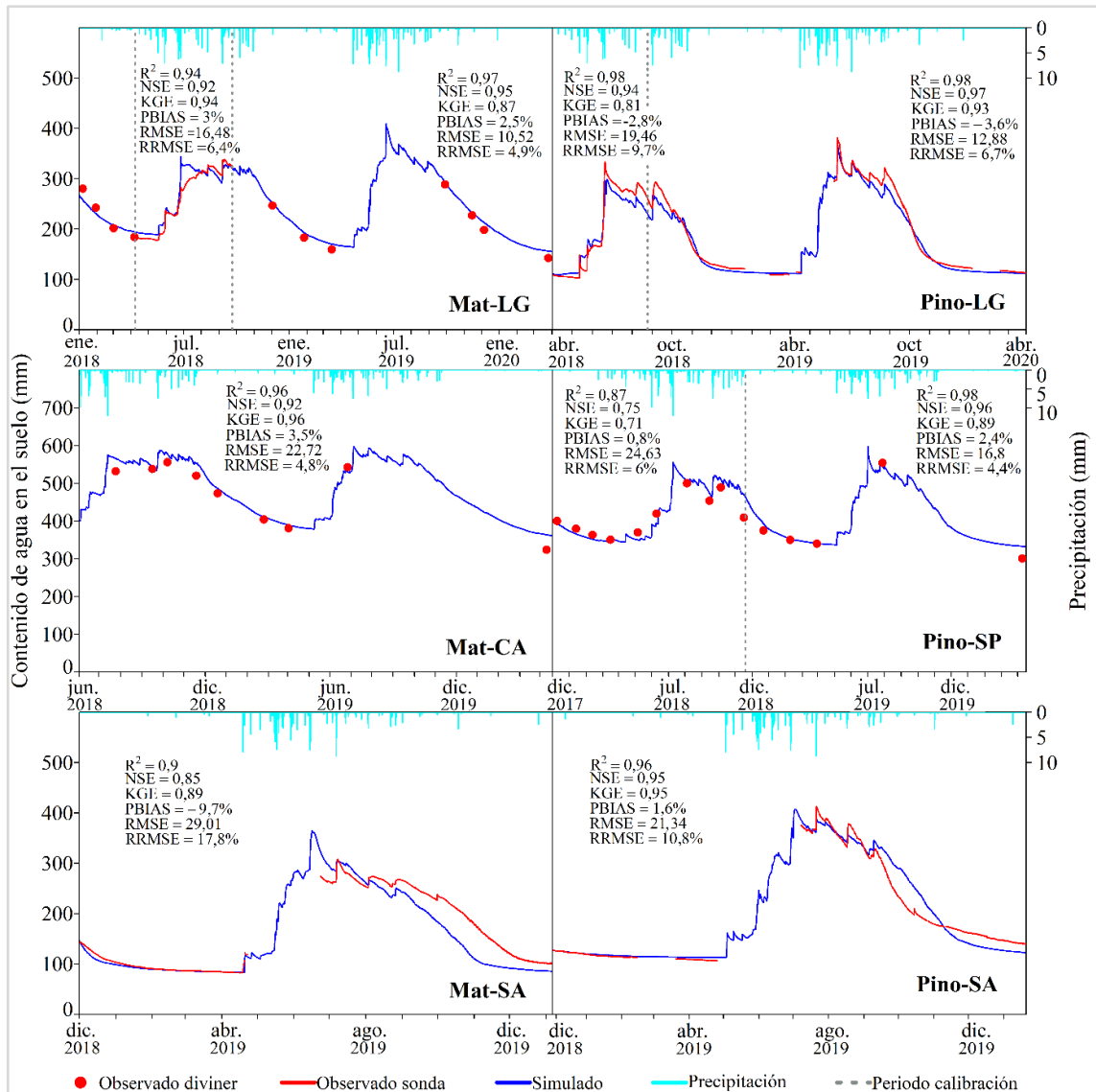


Figura 10. Almacenamiento de agua del suelo observado y simulado en los distintos sitios.

4. Simulación a escala diaria

Como se mencionó en la sección de materiales y métodos, para poder correr el modelo históricamente y a futuro, se debió simular a escala diaria, a diferencia de lo mostrado previamente, que era a escala horaria. En el Cuadro 7 se muestran los resultados estadísticos del almacenamiento de agua en el suelo simulado y observado a escala diaria de cada perfil. Como los sitios CA y SA no se calibraron, solo se presenta la estadística de verificación.

Los valores obtenidos de las medidas de ajuste, como los $R^2 > 0,8$, $NSE > 0,65$, $KGE > 0,75$ y las métricas de error como el RRMSE, que oscilan entre 3 y 30% y $PBIAS < |\pm 20|$ corroboran el buen desempeño del modelo a escala diaria en cada uno de los sitios.

Cuadro 7. Estadística del periodo de calibración y verificación a escala diaria.

| Periodo | Métrica | Matorral | | | Pino | | |
|--------------|----------------|----------|-------|--------|--------|-------|-------|
| | | LG | CA | SA | LG | SP | SA |
| Calibración | R ² | 0,91 | - | - | 0,96 | 0,92 | - |
| | NSE | 0,88 | - | - | 0,94 | 0,84 | - |
| | KGE | 0,82 | - | - | 0,85 | 0,93 | - |
| | PBIAS % | -2,50 | - | - | -2,40 | -3,20 | - |
| | RMSE | 20,20 | - | - | 19,80 | 19,67 | - |
| | RRMSE % | 7,80 | - | - | 10,00 | 4,80 | - |
| Verificación | R ² | 0,98 | 0,94 | 0,80 | 0,96 | 0,93 | 0,98 |
| | NSE | 0,98 | 0,93 | 0,67 | 0,88 | 0,90 | 0,96 |
| | KGE | 0,93 | 0,95 | 0,78 | 0,83 | 0,84 | 0,91 |
| | PBIAS % | -0,70 | 1,40 | -16,60 | -10,50 | 1,80 | -6,80 |
| | RMSE | 6,70 | 20,60 | 42,50 | 27,00 | 26,00 | 19,60 |
| | RRMSE % | 3,20 | 4,30 | 26,60 | 14,20 | 7,00 | 10,00 |

5. Verificación de la transpiración a través del flujo de savia

El experimento del medidor de flujo de savia situado en el sitio San Agustín presentó una serie de inconvenientes durante las mediciones, lo que conllevó a tener ventanas de datos sin medición y sensores que no funcionaron por desperfectos eléctricos y corte de cables. Finalmente, hubo una repetición por cobertura, que midió correctamente desde el 15 de diciembre de 2018 hasta el 7 de mayo del 2020. En la Figura 11 se muestra la relación entre las transpiraciones obtenidas desde el flujo de savia y las estimaciones de HYDRUS para matorral y pino. El ajuste en ambas coberturas dio valores de $R^2 > 0,70$ y $KGE > 0,55$, que indican un desempeño satisfactorio del modelo, mientras que el PBIAS muestra una subestimación de HYDRUS, pero está dentro los rangos aceptables (Cuadro 4). Finalmente, el RMSE fue de 0,12 mm/d en matorral y 0,28 mm/d en pino, pero para analizar esta métrica es importante ver las escalas entre las que varía la transpiración de cada cobertura, lo que se ve en las series de tiempo presentadas en la Figura 12.

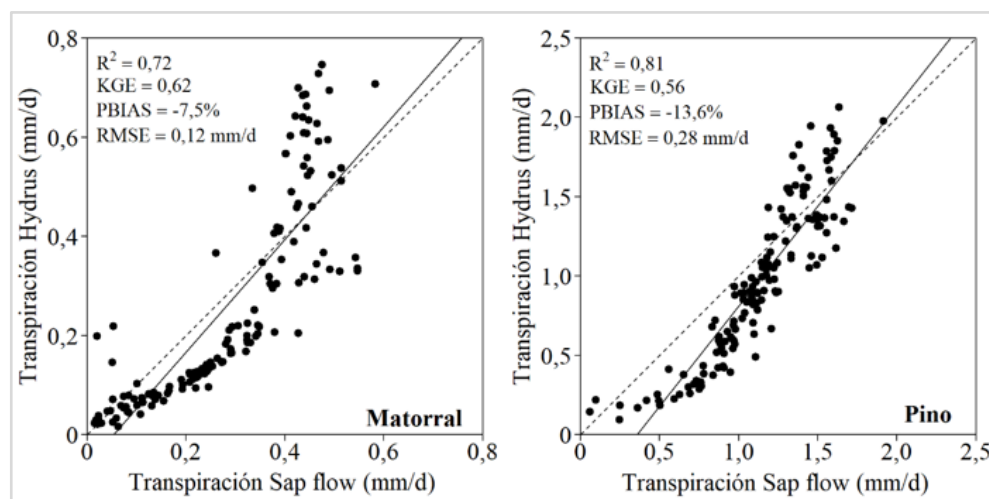


Figura 11. Relación entre la transpiración diaria obtenida del flujo de savia y la estimación de HYDRUS para matorral (izquierda) y pino (derecha).

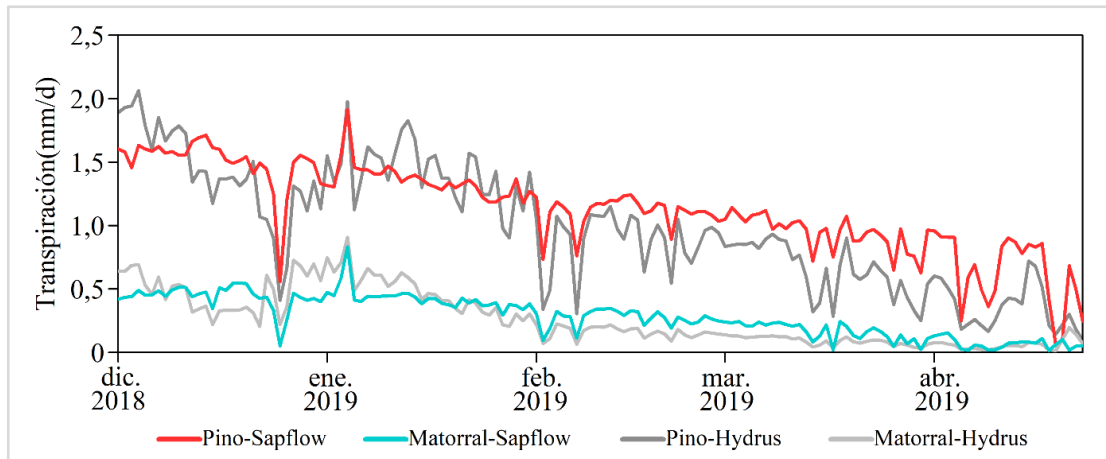


Figura 12. Dinámica de la transpiración diaria de matorral y pino medidos con el flujo de savia y estimadas con HYDRUS.

De la Figura 12 destaca la consistencia entre los valores medidos y modelados, con una tendencia a la subestimación de HYDRUS hacia el final del periodo, cuando disminuye la demanda atmosférica hacia fines del verano, pero continúan los consumos hídricos por parte de ambas coberturas, aunque en menor medida que los meses de diciembre-enero. También destaca que el matorral tiene un notorio menor consumo de agua con relación a los pinos, con las mayores diferencias en la época estival.

II. Evapotranspiración y percolación/capilaridad histórica y futura en los sitios de estudio

1. Dinámica y análisis de tendencia de la evapotranspiración real y percolación/capilaridad histórica (1979-2019)

En la Figura 13 se pueden ver las precipitaciones (P_p), evapotranspiración de referencia (E_{To}), evapotranspiración real (E_{Tr}) y percolación/capilaridad (Per/cap) anuales desde 1979 al 2019 en cada cobertura. La precipitación registrada por la estación Essam está en forma de barras, mientras que las otras variables se graficaron con líneas. La Per/cap se graficó con valores positivos cuando predomina la percolación y valores negativos cuando domina la capilaridad, siendo el pino SA el único sitio que tiene aportes de capilaridad desde la napa. Tanto para la E_{Tr} como Per/Cap se graficó el valor máximo, promedio y mínimo por año, lo que genera un área que muestra la variabilidad de las componente del balance a lo largo de la serie de tiempo.

Al observar el consumo histórico de las especies, se nota una mayor variabilidad en pinos, tanto en la E_{Tr} como en la Per/cap , con un rango visiblemente más amplio que en los matorrales. Estos últimos son los que poseen los menores montos de E_{Tr} y los mayores aportes de agua a la napa. También se observa que en los años con bajas precipitaciones (1995 y 1998) la E_{Tr} baja y los valores de percolación se hacen casi nulos en matorrales, mientras que, en los pinos, los valores se vuelven 0 o menores porque domina la capilaridad

en el balance de dichos años. Cabe mencionar que, en algunos años cuando el consumo de agua (ETr) supera a las precipitaciones, la explicación está dada por la recarga del perfil el año previo, permitiendo dejar reservas de agua en el suelo que pudieron ser ocupadas el año siguiente, esto es notorio para los matorrales en el año 1998, ya que tuvieron una ETr mayor a las precipitaciones debido a las reservas de agua que quedaron del año 1997. Otra razón por la cual la ETr puede ser mayor a las precipitaciones, es lo observado durante los años 2010-2019 en pinos, ya el sitio San Agustín tiene una entrada adicional de agua a través de la capilaridad desde la napa freática.

También es importante señalar que desde 2010 hay una disminución de las precipitaciones, y ello se ve reflejado en una disminución de la percolación en ambas coberturas, siendo en pino necesario acceder constantemente a la capilaridad para sostener los mayores valores de ETr, mientras que en matorral aún se observan montos de percolación. Para ver el comportamiento individual de cada sitio, en el Apéndice 10 están graficadas las variables, evidenciándose que, dentro del grupo de los pinos, el sitio LG es el que presenta los menores valores de ETr y los mayores aportes a la napa, mientras que pino SA es el que presenta el mayor consumo de agua, al tener la mayor ETr y aportes constantes como capilaridad, desde la napa especialmente en los últimos 10 años. Por otra parte, en los matorrales no se observan grandes diferencias entre los sitios.

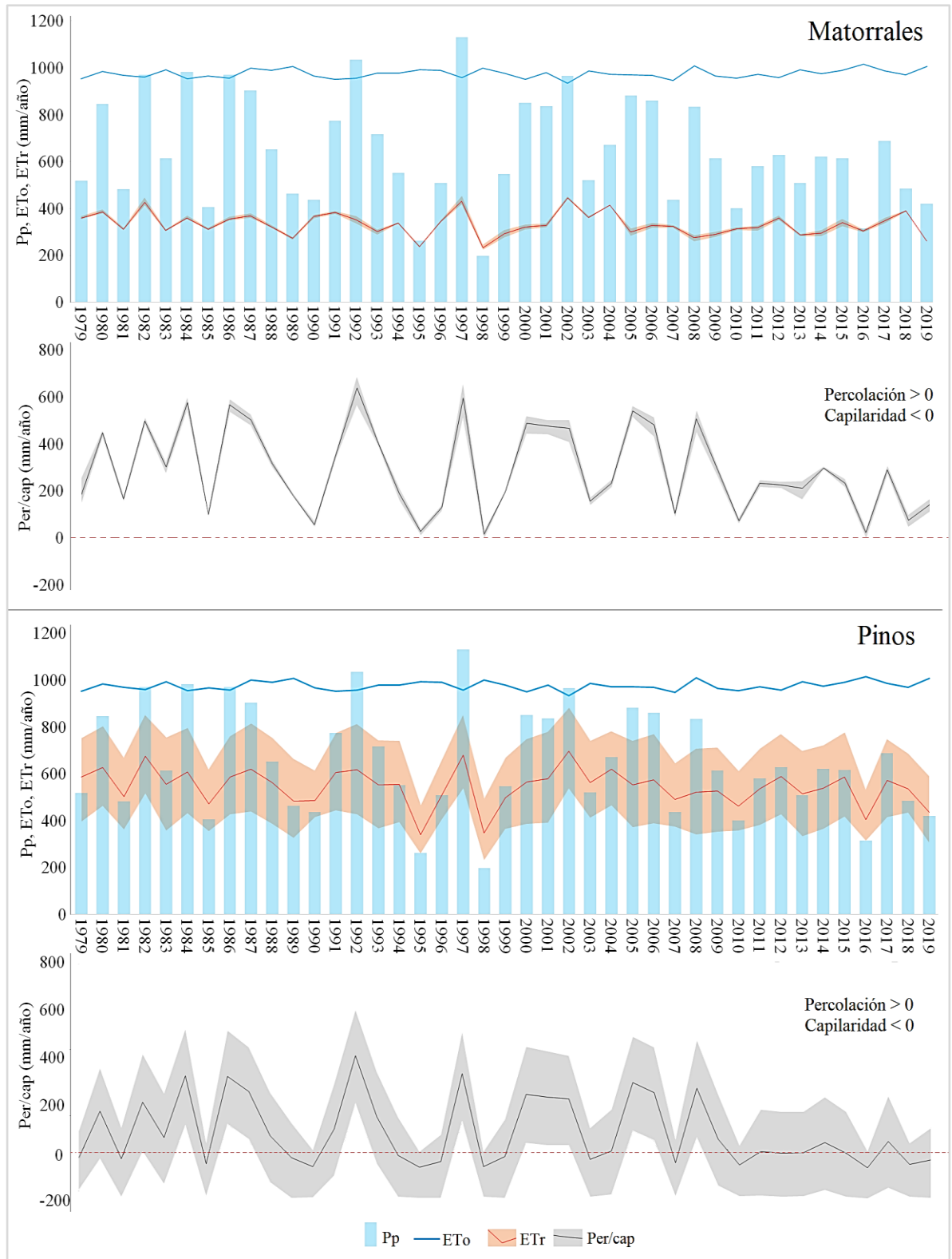


Figura 13. Dinámica de la Pp, ETo, ETr, Per/cap anuales desde 1979 al 2019 en los sitios de matorral y pino (en cada caso se presenta la variabilidad con un color degradado alrededor de la línea promedio).

Los gráficos de los análisis de tendencia de la ETr y Per/cap anual de cada sitio desde 1979 a 2019 se muestran en el Apéndice 10, mientras que en el Cuadro 8 están las significancias del análisis de Mann-Kendall y la pendiente de Sen que señala los milímetros por año que ha crecido o decrecido la variable. Del Cuadro 8 se observan tendencias negativas para la ETr y la Per/cap; en el caso de la ETr, son significativas las disminuciones de los pinos SP y SA, mientras que para la Per/cap arrojaron significancia las tendencias de matorral CA y pino SA.

Cuadro 8. Pendiente de sen (Psen) y significancia de la tendencia de la evapotranspiración real y percolación anuales desde 1979 a 2019 en cada sitio de estudio.

| Variable | Métrica | Matorral | | | Pino | | |
|----------|------------------|----------|--------|-------|-------|---------|--------|
| | | LG | CA | SA | LG | SP | SA |
| ETr | P _{sen} | -0,86 | -1,13 | -1,01 | -1,26 | -1,95** | -1,94* |
| | p-value | 0,22 | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,03 | 0,05 |
| Perc/cap | P _{sen} | -3,84 | -4,45* | -3,28 | -2,81 | -0,21 | -0,86* |
| | p-value | 0,12 | 0,07 | 0,19 | 0,18 | 0,14 | 0,08 |

**p-value<0,05; *p-value<0,1.

Las series y tendencias de ETr y Per/cap estacional desde 1979 a 2019 se muestran en la Figura 14 y el análisis estadístico en el Cuadro 9. Es importante señalar que cada estación se graficó con distinto rango de valores en el eje Y, para poder notar las diferencias entre cada cobertura-sitio. Al ver los resultados de la ETr por estación, se nota un comportamiento similar de todos los sitios en otoño, en tanto al pasar al invierno los pinos se diferencian del grupo de los matorrales, que siguen teniendo un comportamiento similar entre ellos. Luego, en primavera se ven marcadas diferencias del pino SA y pino SP del resto, diferenciándose en 100 a 200 mm adicionales de ETr y finalmente en verano es pino SA el que sigue teniendo una ETr mayor en comparación al resto de los sitios.

En cuanto a la Per/cap, se puede mencionar que pino SA es el que se diferencia notablemente del resto, ya que posee valores negativos, que indican constantes aportes desde la napa (capilaridad), generando solo en invierno percolación hacia la napa. En los demás sitios el comportamiento es similar en sus percolaciones de verano, luego en otoño e invierno el grupo de los matorrales no se diferencian entre ellos, y en primavera se desacoplan la mayoría de las curvas, pudiéndose notar las series individuales de cada sitio-cobertura.

Al observar los valores de las tendencias estacionales de ETr por sitio (Cuadro 9), se ve que todos arrojan pendientes negativas, siendo significativas la disminución en la ETr de otoño para todos los sitios. En cuanto a la Per/cap, también en otoño las tendencias son significativas, en donde los matorrales presentan pendientes negativas, mientras que los pinos tienen pendientes cercanas a cero.

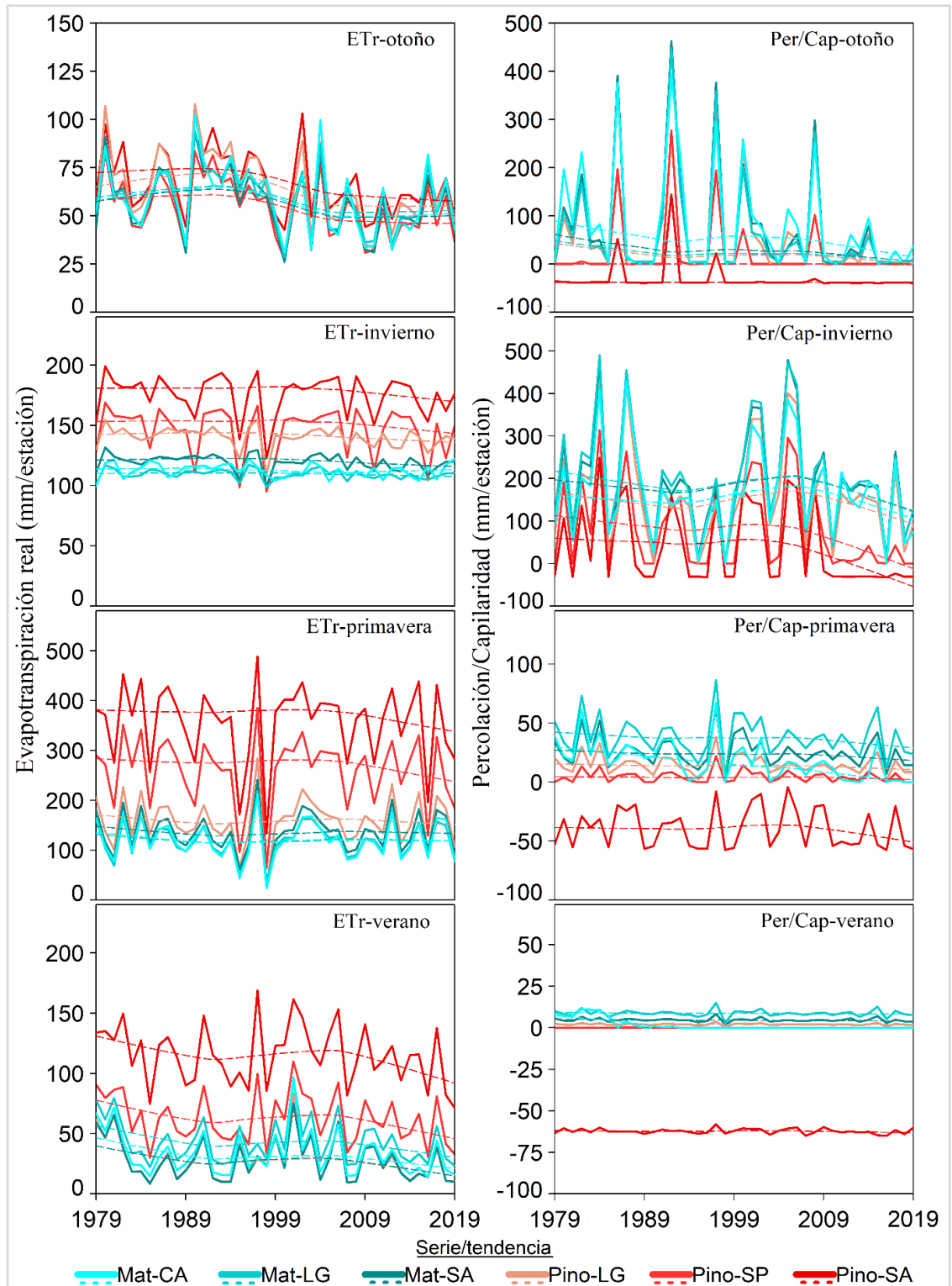


Figura 14. Variaciones estaciones de la evapotranspiración real (izquierda) y la percolación/capilaridad (derecha) con sus líneas de tendencia para cada sitio desde 1979 a 2019.

Cuadro 9. Pendiente de P_{sen} y significancia de la tendencia de la evapotranspiración real y percolación estacionales desde 1979 a 2019 para cada sitio del estudio.

| Variable/estación | Métrica | Matorral | | | Pino | | | | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | LG | CA | SA | LG | SP | SA | | |
| ETr | Otoño | P_{sen} | -0,38* | -0,38* | -0,48** | -0,57** | -0,51** | -0,55** | |
| | | p-value | 0,099 | 0,082 | 0,047 | 0,047 | 0,027 | 0,015 | |
| | Invierno | P_{sen} | -0,07 | -0,08 | -0,16* | -0,18* | -0,19 | -0,18 | |
| | | p-value | 0,238 | 0,363 | 0,064 | 0,061 | 0,221 | 0,286 | |
| | Primavera | P_{sen} | -0,09 | -0,26 | -0,06 | -0,10 | -0,64 | -0,51 | |
| | | p-value | 0,884 | 0,598 | 0,937 | 0,902 | 0,438 | 0,465 | |
| | Verano | P_{sen} | -0,30 | -0,33 | -0,29 | -0,28 | -0,47 | -0,51 | |
| | | p-value | 0,108 | 0,108 | 0,160 | 0,167 | 0,103 | 0,113 | |
| | Per/cap | Otoño | P_{sen} | -0,24** | -0,21 | -0,17** | -0,03* | 0,00** | -0,03** |
| | | | p-value | 0,035 | 0,108 | 0,028 | 0,074 | 0,006 | 0,003 |
| Invierno | | P_{sen} | -1,46 | -0,57 | -0,85 | -0,97 | 0,00 | -0,09 | |
| | | p-value | 0,340 | 0,669 | 0,645 | 0,529 | 0,136 | 0,135 | |
| Primavera | | P_{sen} | -0,23 | -0,71** | -0,18 | -0,11 | 0,00 | -0,04 | |
| | | p-value | 0,204 | 0,000 | 0,229 | 0,317 | 0,503 | 0,728 | |
| Verano | | P_{sen} | -0,02 | 0,00** | -0,02 | -0,01 | 0,00** | -0,01 | |
| | | p-value | 0,340 | 0,000 | 0,234 | 0,216 | 0,003 | 0,500 | |

**p-value<0,05; *p-value<0,1.

2. Evapotranspiración real y percolación/capilaridad en escenarios futuros (2020-2046), periodo de referencia (1979-2005) y megasequía (2010-2019). Diferencias relativas entre el periodo de referencia y escenarios futuros

Para resumir el comportamiento de las variables de ETr y Per/cap en cada periodo de simulación con HYDRUS, se muestran en los cuadros 10 y 11 la mediana (Me), el cuartil uno (Q_1), tres (Q_3), y el rango de los datos por periodo, donde el primero es el de referencia (1979-2005) que se usó para construir los escenarios futuros, luego está el periodo de la megasequía (2010-2019), que para efectos del análisis posterior se hace importante analizar por separado debido a las bajas precipitaciones que presentaron esos 10 años y que afectan directamente a los sistemas analizados, en donde su principal entrada de agua es la precipitación, finalmente, están los tres escenarios futuros (2020-2046), con las proyecciones pesimista, mediano y optimista.

A modo general, del Cuadro 10 se observa que el rango de los datos de ETr de matorral es menor a la mitad del rango de pino, independiente de periodo que se analice, lo que denota una mayor dispersión por parte de los pinos en su comportamiento para los distintos periodos. En cuanto a la Per/cap (Cuadro 11), no ocurre lo mismo que con la ETr, ya que los rangos son más cercanos entre las coberturas, aunque los matorrales siguen teniendo una menor dispersión.

Al comparar las medianas del Cuadro 10, se ve que, independiente del periodo, los pinos consumen entre 180 a 214 mm más de agua que los matorrales equivalente a un 58 a 63%

adicional. Similar situación ocurre si se comparan los cuartiles, mientras que el cuartil 1 da entre un 27 a 38% de ETr adicional de los pinos, el cuartil 3 arroja entre un 74 a 85% mayor de ETr. En cuanto al comportamiento por periodo, los matorrales presentan montos similares de ETr entre el escenario pesimista y la megasequía, no así los pinos, que presentan alrededor de 25 mm menos de ETr en el escenario pesimista que en la megasequía. Si se compara la ETr entre el periodo de referencia y la megasequía, se observa que en matorral la ETr decreció en 22 mm (6,4%) y en pinos en 27 mm (5%). Al analizar la ETr del periodo de referencia con respecto a los escenarios futuros, se observa que los matorrales disminuirían en 29 mm en el escenario pesimista (-8,5%) y en 7 mm en el escenario mediano (-2%), mientras que en el optimista tendrían un aumento de 12 mm (+3,5%). Por su parte los pinos en el escenario pesimista disminuirían su ETr en 54 mm (-9,9%), en el mediano habría solo una disminución de 2 mm (-0,3%) y en el escenario optimista aumentarían en aproximadamente 20 mm (3,8%).

Cuadro 10. Mediana (Me), cuartiles (Q₁ y Q₃) y rango de la evapotranspiración real para cada sitio-cobertura separados en los periodos de referencia (Ref.), megasequía y escenarios futuros.

| | | Evapotranspiración real (mm año ⁻¹) | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------------|---|-----|-----|-----------------|-----|-----|----------------------|------------|------------|
| | | Sitios Matorral (M) | | | Sitios Pino (P) | | | Resumen ¹ | | |
| Periodo | | LG | CA | SA | LG | SP | SA | M | P | |
| Ref. (1979-2005) | Q ₁ | 306 | 304 | 313 | 365 | 473 | 669 | 308 | 426 | |
| | Me | 346 | 338 | 348 | 396 | 556 | 752 | 340 | 545 | |
| | Q ₃ | 362 | 363 | 376 | 434 | 606 | 788 | 371 | 669 | |
| | Rango | 199 | 212 | 231 | 308 | 379 | 416 | 231 | 652 | |
| Mega sequía (2010-2019) | Q ₁ | 301 | 286 | 299 | 339 | 435 | 630 | 297 | 412 | |
| | Me | 320 | 305 | 323 | 371 | 518 | 702 | 318 | 518 | |
| | Q ₃ | 341 | 332 | 360 | 416 | 549 | 741 | 347 | 606 | |
| | Rango | 125 | 129 | 131 | 129 | 203 | 244 | 132 | 473 | |
| Futuro (2020-2046) | Pesimista | Q ₁ | 296 | 280 | 302 | 338 | 368 | 559 | 286 | 364 |
| | | Me | 316 | 299 | 320 | 364 | 499 | 695 | 311 | 491 |
| | | Q ₃ | 344 | 327 | 353 | 401 | 556 | 755 | 342 | 600 |
| | | Rango | 237 | 247 | 296 | 354 | 441 | 495 | 296 | 705 |
| | Mediano | Q ₁ | 309 | 290 | 317 | 369 | 433 | 630 | 302 | 393 |
| | | Me | 338 | 318 | 346 | 391 | 549 | 750 | 333 | 543 |
| | | Q ₃ | 365 | 354 | 378 | 431 | 590 | 784 | 363 | 660 |
| | | Rango | 232 | 231 | 300 | 361 | 441 | 501 | 300 | 715 |
| | Optimista | Q ₁ | 323 | 302 | 335 | 387 | 501 | 703 | 317 | 435 |
| | | Me | 362 | 332 | 373 | 422 | 566 | 774 | 352 | 566 |
| | | Q ₃ | 385 | 371 | 401 | 456 | 623 | 820 | 383 | 711 |
| | | Rango | 231 | 227 | 305 | 369 | 439 | 512 | 305 | 731 |

¹Resumen: mediana general de cada cobertura por periodo.

En cuanto al comportamiento de la Per/cap, al comparar las medianas y cuartiles de cada cobertura (Cuadro 11) se ve que los matorrales tienen mayores montos de percolación en todos los periodos. Al enfocarse solo en la mediana, se observa que los matorrales generan entre 184 a 237 mm adicionales de percolación que el grupo de los pinos, independiente del

periodo. Al analizar el comportamiento por periodo, se ve que la percolación durante la megasequía con respecto al periodo de referencia bajó en más de 100 mm para matorrales y 80 mm en pinos. Cuando se compara el periodo de referencia con los escenarios futuros, los matorrales disminuirían en 140 mm su percolación (-42%) y en 61 mm en el escenario mediano (-19%), mientras que los pinos disminuirían en 85 mm en el escenario pesimista (-98%) y en 57 mm en el escenario mediano (-66%). Finalmente, tanto pinos como matorrales aumentarían su percolación en 19 mm en el escenario optimista en comparación al periodo de referencia, que en variaciones porcentuales corresponde a un aumento en un 5,8% en matorrales y a un 22% en pinos.

Es importante observar los comportamientos de cada sitio del grupo de los pinos, ya que pino SA tiene predominancia de valores negativos en sus montos, los que indican capilaridad desde la napa, mientras que los otros sitios de plantación presentan montos nulos (0) o valores positivos, indicativo de percolación. El sitio de pino que genera los mayores valores de percolación es LG, teniendo en algunos periodos medianas cercanas a las del matorral CA (escenario pesimista).

Cuadro 11. Mediana (Me), cuartiles (Q₁ y Q₃) y rango de la percolación/capilaridad para cada sitio-cobertura separados en los periodos de referencia (Ref.), megasequía y escenarios futuros.

| Periodo | | Percolación/capilaridad (mm año ⁻¹) | | | | | | | Resumen ¹ | |
|-------------------------------|----------------|---|-----|-----|-----------------|-----|------|------------|----------------------|------------|
| | | Sitios Matorral (M) | | | Sitios Pino (P) | | | M | | |
| | | LG | CA | SA | LG | SP | SA | | | |
| Ref. (1979-2005) | Q ₁ | 181 | 152 | 155 | 105 | 0 | 36 | 160 | 0 | |
| | Me | 332 | 302 | 312 | 252 | 86 | -124 | 323 | 86 | |
| | Q ₃ | 514 | 468 | 494 | 434 | 249 | -185 | 502 | 251 | |
| | Rango | 656 | 565 | 648 | 594 | 415 | 398 | 686 | 791 | |
| Mega sequía (2010-2019) | Q ₁ | 114 | 75 | 99 | 56 | 0 | -182 | 87 | 50 | |
| | Me | 239 | 188 | 226 | 172 | 7 | -184 | 216 | 6 | |
| | Q ₃ | 250 | 217 | 236 | 180 | 13 | -186 | 244 | -176 | |
| | Rango | 266 | 292 | 268 | 232 | 50 | 45 | 304 | 432 | |
| Futuro (2020-2046) | Pesimista | Q ₁ | 73 | 49 | 59 | 24 | 0 | -120 | 54 | 109 |
| | | Me | 194 | 137 | 185 | 131 | 1 | -192 | 185 | 1 |
| | | Q ₃ | 329 | 275 | 317 | 262 | 88 | -194 | 316 | -113 |
| | | Rango | 426 | 359 | 418 | 368 | 186 | 176 | 444 | 568 |
| | Mediano | Q ₁ | 127 | 88 | 114 | 62 | 0 | -25 | 110 | 203 |
| | | Me | 278 | 219 | 262 | 204 | 39 | -176 | 262 | 29 |
| | | Q ₃ | 434 | 369 | 421 | 362 | 184 | -192 | 419 | -25 |
| | | Rango | 573 | 454 | 565 | 511 | 328 | 317 | 594 | 710 |
| | Optimista | Q ₁ | 178 | 136 | 159 | 109 | 0 | 74 | 161 | 0 |
| | | Me | 366 | 302 | 348 | 289 | 105 | -97 | 342 | 105 |
| | | Q ₃ | 552 | 460 | 532 | 463 | 297 | -190 | 513 | 289 |
| | | Rango | 676 | 560 | 668 | 614 | 428 | 410 | 703 | 812 |

¹Resumen: mediana general de cada cobertura por periodo.

A continuación, en la Figura 15 se presentan las diferencias relativas anuales de la ETr y Per/cap entre el periodo de referencia (1979-2005) y el periodo futuro (2020-2046) para cada sitio en los distintos escenarios de cambio climático (pesimista, mediano, optimista). En el Apéndice 11 están las figuras de diferencias relativas estacionales de la ETr y Per/Cap.

En base a la Figura 15a, no se nota un patrón claro para cada cobertura, sino que hay algunos sitios individuales que muestran un comportamiento diferente al resto, por ejemplo, matorral LG tiene una distribución de datos que tiende a estar por sobre el resto, sobre todo en el escenario optimista. Por su parte, pino SA tiende a tener una distribución menos dispersa y con medianas por sobre los otros sitios, a excepción del matorral LG. Por último, destaca el comportamiento de matorral CA, que en los escenarios mediano y optimista tiende a quedar por bajo los demás. A modo general se observa que las coberturas responden de manera similares a los escenarios de cambio climático, ya que disminuyen su ETr en el escenario pesimista y mediano, y luego aumentan de manera más o menos similar en el escenario optimista.

Por su parte, la Per/cap (Figura 15b) muestra mayor variabilidad en las respuestas de los sitios a cada escenario futuro, donde destaca el pino SA con una tendencia en el futuro a tener mayor percolación/capilaridad con respecto al periodo histórico, independiente del escenario. Por su parte, los matorrales de LG y SA presentan una distribución de valores menos dispersos que el resto de los sitios para cada escenario futuro. Matorral CA muestra valores más dispersos en su distribución y mayoritariamente porcentajes negativos.

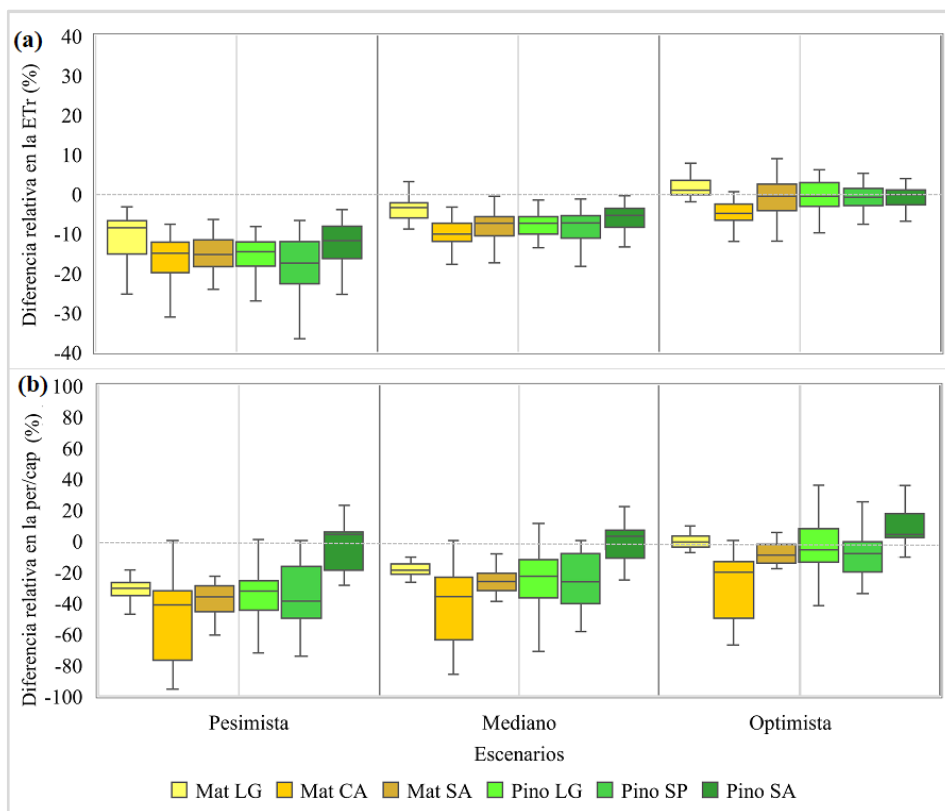


Figura 15. Diferencia relativa de la evapotranspiración real (a) y percolación/capilaridad (b) anual para los tres escenarios futuros con respecto al periodo de referencia.

En cuanto a las diferencias relativas estacionales de la ETr (Apéndice 11.1), estas muestran de forma unánime que la variable aumentará en invierno y disminuirá en verano independiente del escenario analizado. En otoño y primavera, disminuirá la variable en los escenarios pesimista y mediano, mientras que en la simulación optimista no hay un comportamiento homogéneo entre todos los sitios, por ejemplo, en el otoño-optimista aumentarán todos menos matorral CA y pino SA, y en la primavera-optimista tenderán a disminuir los matorrales CA, SA y pino LG.

Las diferencias relativas estacionales en la Per/cap (Apéndice 11.2), mostraron que en otoño y verano los montos serán generalmente negativos independientes del escenario, en invierno se observará un aumento de la variable solo en el escenario optimista, y en primavera disminuiría la variable a excepción de pino SA, que muestra aumentos en todos los escenarios, pero ello es debido a aumentos en la capilaridad.

III. Efecto del cambio de uso/cobertura de suelo sobre la evapotranspiración real y percolación de la cuenca

El cambio en la ETr y la percolación por año que ha habido al sustituir 7.751 hectáreas de matorral espinoso por plantaciones (Figura 7) para cada periodo se expresa en las figuras 16 y 17, mostrando en el eje principal el volumen de agua en $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ y en el eje secundario los indicadores de seguridad hídrica usados en este estudio que son los equivalentes a camiones aljibe año^{-1} y los embalses Tutuvén año^{-1} . En la Figura 16, los valores de los ejes son positivos, ya que muestran el volumen adicional de agua que ha salido del sistema como ETr al tener plantaciones, mientras que en la Figura 17 los valores del eje son negativos, ya que muestran el volumen de agua que no ha salido del sistema como percolación.

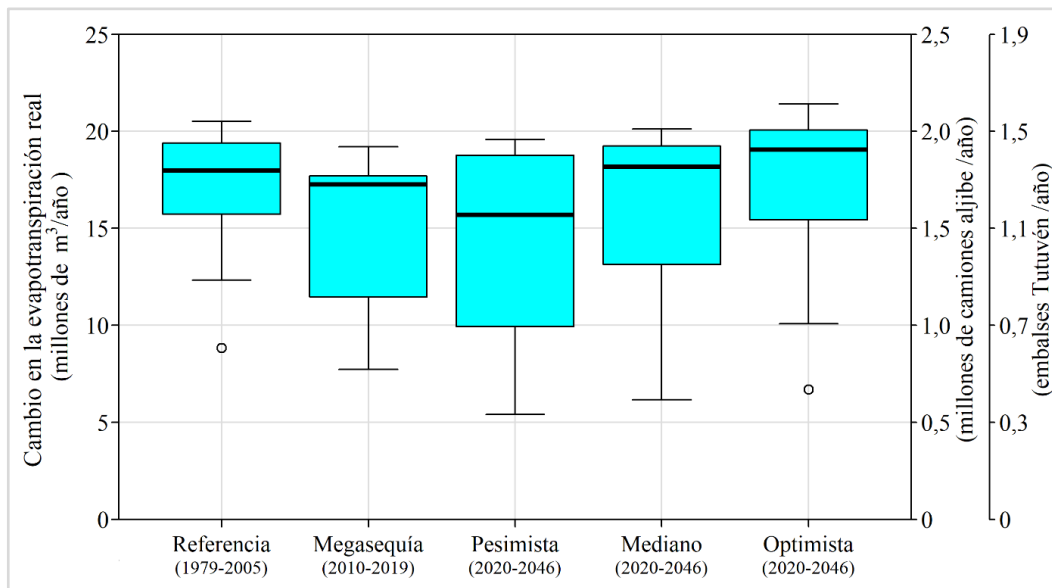


Figura 16. Cambio en la evapotranspiración real anual producto del reemplazo de matorrales por plantaciones de pinos en los distintos periodos de análisis.

De la Figura 16 se desprende que, si el cambio actual de uso/cobertura hubiera ocurrido entre los años 1979 a 2005, habría significado entre 12,3 a 20,5 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ de ETr adicional en el periodo. Luego, en la megasequía (2010-2019), ese mismo reemplazo significaría entre 7,7 a 19,2 millones $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ adicionales de ETr que van a la atmósfera. Finalmente, si se supone que las coberturas actuales se mantienen entre el 2020 al 2046, el agua evapotranspirada adicional será entre 5,4 a 19,5 millones $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ en el escenario pesimista, entre 6,1 a 20,1 millones $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ en el escenario mediano y entre 8,4 a 21,4 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ en el optimista. El análisis del cambio en la ETr se puede abordar desde las equivalencias en camiones aljibe o en embalses Tutuvén (eje secundario), donde se muestra que independiente del periodo en que se simuló, la salida extra de agua del sistema equivale entre 1,5 a 1,9 millones de camiones aljibe por año o entre 1,2 a 1,5 embalses Tutuvén año^{-1} (los valores corresponden a las medianas de cada periodo, ver Apéndice 12).

En cuanto a la percolación (Figura 17) se puede mencionar lo siguiente: si el cambio de uso/cobertura actual hubiera ocurrido en el periodo de 1979 a 2005, habría generado una disminución de la percolación entre 8,9 a 22 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$. Luego, en la megasequía, se ve que la disminución es más dispersa en comparación al periodo histórico, con valores que oscilan entre 6,5 a 19,7 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$. Finalmente, si el reemplazo que hay actualmente en la cuenca se mantuviera en el futuro (2020-2046), el periodo pesimista y mediano mostrarían una disminución entre 5,7 a 20 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, mientras que el escenario optimista, tendría un rango más acotado, con valores que fluctúan entre 9,1 a 20 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ (detalle en Apéndice 12.2). El cambio en la percolación expresado en camiones aljibe fluctúa entre 1,4 a 1,8 millones de camiones aljibe año^{-1} o entre 1,1 a 1,4 embalses Tutuvén año^{-1} (medianas de los periodos, ver Apéndice 12.2).

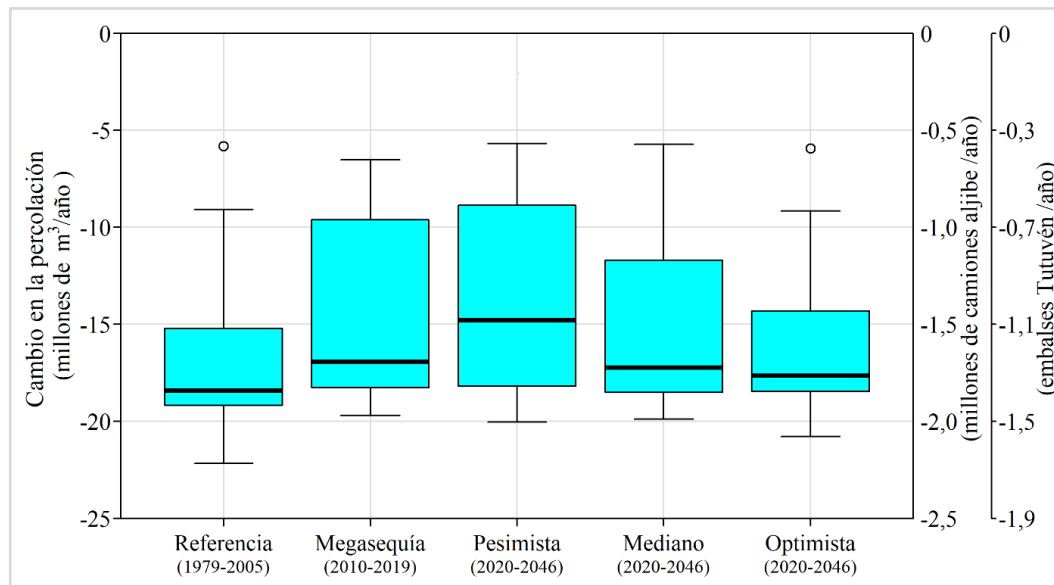


Figura 17. Cambio en la percolación anual producto del reemplazo de matorrales por plantaciones de pinos en los distintos periodos de análisis.

Con relación a la dispersión que se observa en cada periodo de las figuras anteriores, ella se debe a las variabilidades de la ETr y percolación en cada sitio-cobertura que se vieron

anteriormente en los cuadros 11 y 12. Respecto al valor atípico que se observa en el periodo de referencia (figuras 16 y 17, punto localizado por fuera de la barra de dispersión), este corresponde a los valores del año 1998, el cual fue el año más seco que tiene registrada la estación meteorológica Essam. En el escenario optimista también se presenta un valor atípico, el cual está relacionado a un año de sequía extrema similar a la ocurrida en el año 1998, pero que ocurre en la simulación del clima futuro. En los escenarios pesimista y mediano, igualmente están los datos provenientes de años con bajas precipitaciones, pero no se ven como outliers porque quedan dentro de la distribución que abarca el boxplot de cada periodo.

DISCUSIÓN

I. Implementación del modelo de transferencias hídricas

1. Calibración y verificación a través de mediciones de contenido de agua en el suelo

En los primeros horizontes que estaban entre los 0 a 30 cm, se hizo relevante la calibración realizada a los sensores (Apéndice 8), ya que, en la fase previa a la aplicación de las ecuaciones de ajuste, se vio que los mayores errores de sesgo se presentaban en dichas profundidades, que era donde hay mayores contenidos de materia orgánica (Anexo 14). Un ejemplo de ello ocurrió en el matorral CA, en el nodo de los 13 cm (Apéndice 9), el cual presentó un PBIAS de 36% y RMSE de 0,08 que muestran una alta sobrestimación del modelo en esa profundidad, pero el desacoplamiento es debido a que a ese horizonte se le debería haber realizado una calibración específica debido a sus mayores porcentajes de materia orgánica con respecto al resto del perfil (Muñoz-Carpena, 2004).

Los análisis de sensibilidad manual que se hicieron para saber qué parámetros influían más en las salidas del modelo en los sitios que debían calibrarse inversamente a través de HYDRUS, arrojaron distintos resultados según el perfil. En pino SP se calibró inversamente la K_s , ya que esto permitió un mayor ajuste entre el contenido de agua simulado y observado, mientras que en matorral y pino LG fueron el n , α y K_s . Brunetti et al. (2016) identificó que los parámetros con mayor efecto en la salida de HYDRUS eran el n , α y K_s , pero las condiciones de su experimento eran distintas a las de este estudio. Los parámetros por ajustar dependen de cada perfil, siendo su identificación un desafío que demanda mucho tiempo al tener que ir ajustando los parámetros manualmente, por lo que en futuras investigaciones es recomendable incorporar un método de análisis de sensibilidad global (ASG) que permita identificar los parámetros más influyentes, la interacción entre estos y cómo ellos influyen en la salida del modelo (Saltelli et al., 2008). Entre los ASG más usados está el de Sobol (1993, 2001) que ha sido ampliamente utilizado en modelos con múltiples parámetros, como es el caso de HYDRUS (Song et al., 2015; Brunetti et al., 2017).

En cuanto a la calibración inversa en HYDRUS, se trató de que los parámetros hallados quedaran entre los rangos establecidos por Carsel y Parrish (1988), lo que se logró en la mayoría de los casos, salvo en algunos horizontes donde hubo condiciones puntuales propias de cada perfil. Por ejemplo, en el sitio matorral LG se calibró el parámetro n del 2° horizonte, que tiene un espesor de 10 cm y está antecedido por una capa con menos de 36% de arena; de este modo, si bien el valor calibrado tendió a disminuir el valor de n a pesar de ser un horizonte arenoso (Anexo 12), al observar el contexto en el que está inserto y la curva de retención de agua (Apéndice 6) se logró un buen ajuste con este nuevo valor. En el pino LG la calibración se enfocó en los horizontes caracterizados con barro, como el α del 6° horizonte (Cuadro 5) que, aunque no se ajusta a los rangos establecidos para la textura de esa capa (Anexo 12), la cementación que hay en él provocó una acumulación de agua (Figura 9, Pino-LG:120cm) por ello el valor de α hallado se asemeja más a los establecidos para texturas

finas. Otro cambio relevante en pino LG fue calibrar el contenido a saturación (Q_s) del 4° horizonte, pero este no muestra un ajuste adecuado con las observaciones de laboratorio (Apéndice 6); sin embargo, dicha capa tenía un alto contenido de grava de cuarzo (~60%) que no permitía que el sensor observara un Q_s como el estimado por Rosetta, pero como no se hizo una calibración del sensor en profundidad, no se podía corregir el valor observado.

En el pino SP, las K_s calibradas para el 2°, 3° y 6° horizontes están fuera del rango establecido para texturas finas (arcillo arenosa y arcillosa); por otra parte, como no se realizaron mediciones *in situ* de este parámetro, no es posible corroborar el ajuste de estos a la realidad del perfil, pero sí se podría inferir la ocurrencia de flujo preferenciales, debido a los altos contenidos de arcilla en este (Pathak et al., 2011), presencia de cutanes (Apéndice 1) y a los constantes procesos de humectación y secado a los que están expuestos los sistemas de climas mediterráneos (Fuentes et al., 2015), que causan la generación de grietas, favoreciendo un mayor flujo de agua que lo estimado por Rosetta. También fue común encontrar la presencia de bioporos, los cuales elevan considerablemente la conductividad hidráulica (Etana et al., 2013).

Sobre la implementación del modelo, las verificaciones a nivel de nodo generaron estadígrafos de satisfactorios a excelentes, todo ello debido a la caracterización detallada del perfil en HYDRUS a través de los análisis físicos, las descripciones morfológicas y las observaciones de los sensores, que hicieron entender cómo funcionaba el perfil en sus diferentes horizontes, además de las correctas condiciones de contorno que se establecieron, lo que incluye los datos meteorológicos en una escala continua, en especial los montos de precipitaciones recopilados. Todo ello se hace especialmente notable en el sitio matorral LG (Figura 8), el cual posee horizontes contrastantes, aun así, el modelo logró notar las diferencias en la dinámica del contenido de agua en las diferentes capas. No obstante, hubo dos nodos que mostraron $NSE < 0,5$; el primero fue matorral CA en la profundidad de 153 cm, con un $NSE = 0,47$, explicado porque este sitio presentaba altos contenidos de arcilla masiva (sin estructura) y las mediciones de laboratorio mostraban una curva de retención más bien plana (Apéndice 6), pero el sensor muestra un perfil dinámico, con cambios en el contenido de agua (Figura 8). Ante esta situación, se intentó realizar una calibración inversa, pero los valores hallados no mejoraban las métricas estadísticas, así que se decidió dejar sin dicha calibración, ya que a nivel de perfil la dinámica del sitio está bien representada, con un $NSE = 0,92$, $KGE = 0,96$ y un sesgo bajo (Figura 10).

Estudios han sugerido limitaciones de las funciones de van Genuchten-Mualen cerca de la saturación del suelo y la incapacidad de la función de conductividad hidráulica para explicar la macroporosidad (Rassam et al., 2018). Es por lo que en futuras investigaciones se podría aplicar la función modificada de van Genuchten-Mualen (Schaap y van Genuchten, 2006), que incorpora una presión de entrada de aire pequeña pero constante en la curva de retención de agua, lo que mejora la descripción de la conductividad hidráulica cercana a la saturación y es recomendada para suelos con texturas finas, que tienen valores de $n < 1,2$ como es el caso de matorral CA.

El otro nodo que presentó un NSE deficiente fue el de pino LG, a los 160 cm ($NSE = 0,14$ en el periodo de verificación). Si bien el valor de NSE es insatisfactorio, las demás métricas como el $KGE = 0,73$ y RMSE de 0,01 muestran un buen desempeño del modelo, donde se ve

que logra representar la dinámica de este horizonte, la cual es más bien lineal, debido a que las raíces no pueden sacar agua a esa profundidad por el impedimento físico que causa la cementación de los 110 cm. En este caso, el valor obtenido de NSE sería más bien una limitación del índice que una simulación deficiente (McCuen et al., 2006; Muleta, 2012), es por ello que es necesario analizar las simulaciones con distintas métricas, ya que en este caso el KGE muestra que la simulación es buena (Gupta et al., 2009).

El desempeño del modelo a escala horaria es desde bueno a excelente, esto muestra que HYDRUS simula adecuadamente el contenido de agua en el perfil de suelo en los sitios de estudio (Figura 9). Luego, con el cambio de escala temporal de horaria a diaria, el modelo continuó simulando satisfactoriamente la variable en el tiempo, pero hubo variaciones en las medidas de ajuste dependiendo del sitio: en matorral SA y pino LG disminuyó el ajuste, en pino SP disminuyó levemente, matorral CA y pino SA se mantuvieron más menos con los mismos valores y en matorral LG mejoró el ajuste. Batalha et al. (2018) abordan el efecto del cambio de escala en las tasas de recarga de agua subterránea, indicando que a escalas de tiempo más pequeñas se obtenían mayores recargas que a escalas más grandes, esto debido a la distribución desigual de las precipitaciones donde hay estaciones secas y húmedas, al factor suelo y a la escorrentía, ya que, al usar datos con pasos de tiempos más grandes, el agua infiltrada llega a menos profundidad porque está más expuesta a la evaporación. Cuando se realizan simulaciones en suelos de texturas gruesas, se tiende a sobreestimar la evaporación y a subestimar las recargas, mientras que en texturas finas se regula más este efecto y son menos dependientes de la escala de tiempo usado; por otro lado, la escorrentía se subestima porque al tomar un dato a escala más grande de tiempo, no se considera la intensidad de un evento de lluvia, que puede superar la conductividad hidráulica saturada del suelo y por ende causar escorrentía. Lo visto por estos autores coincide en algunos sitios del presente estudio, ya que matorral CA, que es el sitio con textura más finas, mantuvo su desempeño; pino SP, que también es de textura fina, disminuyó levemente su rendimiento, y por otro lado matorral SA y pino LG, que son de textura gruesa, tendieron a bajar sus métricas. Pino SA mantuvo sus métricas, aunque tiene altos porcentajes de arena, pero ello debe ser porque tiene una napa que le da cierta estabilidad a estos cambios de escala.

Es importante señalar que el modelo se calibró y verificó entre los años 2018 a 2020 (Figura 10), y en este periodo las precipitaciones fueron bajas en comparación a lo normal en Cauquenes, debido a la megasequía ocurrida en la zona central de Chile (Garreaud et al., 2020). Es por ello que sería recomendable continuar las mediciones de contenido de agua en los distintos sitios, para verificar el modelo en condiciones de precipitación más normales a las actuales o durante eventos extremos de precipitación, de corta duración, pero de alta intensidad, como los que se prevé que aumenten a causa del cambio climático (Min et al., 2011). Lo anterior es especialmente importante para los sitios en que se aplicó calibración inversa, ya que es necesario ver si los parámetros encontrados generan adecuadas simulaciones ante contenidos de agua con mayor variabilidad.

2. Verificación de la transpiración a través del flujo de savia

Las estimaciones de transpiración obtenidas por el modelo HYDRUS (Figura 11) muestran un adecuado ajuste con respecto a las mediciones de transpiración obtenidas del flujo de

savia. Al analizar en detalle la dinámica de la transpiración a lo largo de los 5 meses de medición (Figura 12), se observa que la transpiración de HYDRUS en pinos y matorrales muestra primero un periodo en que tiende a sobreestimar (dic-enero), mientras que, desde febrero en adelante, HYDRUS subestima constantemente y desde abril las transpiraciones de matorrales se tienden a igualar.

Para analizar la dinámica de transpiración es necesario hacerlo en conjunto con las curvas de contenido de agua en el perfil de suelo (Figura 10, Mat-SA y Pino-SA). En ellas se nota que, al aproximarse los meses de enero-febrero del 2019, el contenido de agua se acerca a sus valores residuales, por lo que el modelo subestima a partir de esa fecha, ya que no hay suficiente agua en el suelo simulado en el modelo para sustentar transpiraciones más altas. En el caso del matorral, el ajuste del contenido de agua es máximo en abril del 2019, y esto es coincidente con el ajuste entre las transpiraciones para la misma fecha (Figura 12). Por su parte, la subestimación de HYDRUS en pinos en comparación a lo que registró el flujo de savia, muestra que el almacenamiento de agua en el suelo (Figura 10) no es suficiente, por lo que una posibilidad es que haya mayores aportes de agua por capilaridad desde la napa estable, que se ubicó a los 3,40 m; es decir, esta napa tendría una variación de su profundidad, lo que no fue incorporado a la simulación por falta de mediciones de la profundidad de la napa en otras estaciones del año. Otra fuente de variación es que la ETo con la que se estima la demanda de la atmósfera para HYDRUS se realizó con la estación de INIA-Cauquenes, que se encuentra a aproximadamente 15 km de distancia del sitio San Agustín, por lo que podría haber diferencias locales que generan la discordancia entre HYDRUS y el equipo del flujo de savia.

Un aspecto importante que podría explicar la subestimación de HYDRUS es el modelo utilizado de absorción de agua de las raíces, ya que si bien el uso de los valores establecidos por Grinevskii (2011) dieron buenos resultados en las simulaciones del contenido de agua en el suelo y en la estimación en la transpiración, es necesario investigar más en detalle los umbrales de funcionamiento para cada una de las coberturas, ya que existe variación de la función entre especies (Van Dam et al., 1997), aspecto esencial al querer comparar los consumos de agua entre pino y matorral en sistemas semiáridos. Zeng et al. (2018) realizaron un análisis de sensibilidad al modelo de Feddes, que modela la absorción real de las raíces, encontrando que el factor de estrés relacionado al cese de la absorción de las raíces (punto de marchitez permanente) tenía un alto impacto en dicha variable, por lo que sería recomendable hacer mediciones *in situ* de dicho punto más que usar datos preestablecidos en la literatura. Además, es sabido que dichas funciones no solo dependen de las condiciones hídricas del suelo, sino que también de la demanda atmosférica del lugar (Yang et al., 2012), el tipo de suelo y la densidad de raíces, entre otros (Schröder et al., 2014), por lo que este punto debería abordarse en estudios futuros, ya que la información es escasa para especies forestales. Por ejemplo, Rabbel et al. (2018) parametrizaron la función de Feddes para *Picea abies* (conífera) a través de mediciones de flujo de savia durante 2 años, en tanto Yang et al. (2012) parametrizaron la función S-shaped con mediciones de flujo de savia y mediciones de potencial de pre-alba en *Allocasuarina verticillata*, sugiriendo que las especies forestales pueden presentar actividad de raíces más allá de los valores clásicos definidos para cultivos agronómicos.

En cuanto a la dinámica del flujo de savia observada en pino, los resultados son concordantes con lo reportado por White et al. (2020), quienes analizaron el flujo de savia en *Pinus radiata* y *Nothofagus glauca* (Hualo) en un sector cercano (a 80 km), encontrando que, para un rodal mixto con un tercio de árboles de pinos, estos aportaban un 60% de la transpiración del área, debido al alto flujo de savia que poseían en comparación a los hualos, sobre todo en invierno, donde los hualos bajaban su tasa de flujo (al igual que los matorrales de *Acacia caven*) y los pinos seguían manteniendo una alta actividad.

II. Evapotranspiración real y percolación/capilaridad histórica (1979-2019) y en los escenarios futuros (2020-2046)

1. Análisis de los montos de ETr y percolación/capilaridad

La variabilidad de la ETr y la Per/cap anual (Figura 13) para matorral, muestran un comportamiento más estable que pino, aunque los tres sitios de matorral presentan distintas coberturas (49% LG, 24% CA y 60% SA). Esto puede ser explicado por el uso del agua relativamente similar en términos de magnitud por parte de la pradera, lo que contrarresta el efecto de una menor cobertura de *Acacia caven*. Además, la mayoría de las raíces de matorral se concentran en el primer metro de profundidad (Apéndice 1), como lo visto por Sepúlveda et al. (2018), quienes hicieron estudios en la zona central de Chile y observaron que esta especie posee un sistema radicular fuertemente activo en los primeros 100 cm del suelo, haciendo un uso minucioso del agua acumulada en ese rango de profundidad después de cada evento de lluvia.

En pinos se presenta una mayor variabilidad en la ETr y la Per/cap entre sitios, lo que resalta la importancia del suelo donde estos están asentados. En los pinos analizados, el sitio LG presentó bajos valores de ETr y la mayor percolación debido a un impedimento físico para seguir expandiendo sus raíces en profundidad, por lo que tiene menos agua disponible a utilizar para evapotranspirar, en tanto el agua que pasa de los 120 cm puede ser percolada al no estar sometida a la acción de las raíces. Luego, está pino SP, que posee un mayor *IAF* que LG y un suelo de textura fina, con un desarrollo potencial de raíces hasta los 3 m (Watson y O’Loughlin 1990; Huber y Trecaman, 2000; CORMA, 2015). Este presenta valores intermedios de ETr en el grupo de las plantaciones, y es pino SA el que presenta los mayores consumos de agua, porque además de usar las precipitaciones, presenta una napa a la que accede y le permite solventar los altos valores de ETr que tiene en comparación al resto. Hubert y Trecaman (2004) concluyen en su estudio que los distintos valores de evapotranspiración anual entre plantaciones forestales establecidas en diferentes zonas se explicaban por las distintas precipitaciones y capacidades de retención de agua por los suelos, pero como en este estudio todos los sitios están expuestos a niveles de precipitación similares, las diferencias se deben principalmente a la mayor capacidad de retención de agua de un suelo por sobre el otro (Hubert et al., 2008). Este patrón espacial de variabilidad de la ETr y percolación también fue observado por Galleguillos et al. (2021) para una sección de la misma cuenca de este estudio, donde la ETr y la percolación fueron caracterizadas por simulaciones del modelo hidrológico SWAT.

Las medianas de la evapotranspiración real y la percolación de los periodos arrojó en matorral niveles entre 311 a 352 mm año⁻¹ de ETr y entre 185 a 342 mm año⁻¹ de percolación, mientras que en pino se obtuvieron entre 491 a 566 mm año⁻¹ de ETr y entre 1 a 105 mm año⁻¹ de percolación. Estudios como el de Huber et al. (2008) reportaron valores de ETr para plantaciones de pino en un transecto latitudinal desde los 35° a 39° S, lo que permitía tener a la cobertura expuesta a distintas precipitaciones, obteniendo consumos desde 401 a 694 mm año⁻¹. Los mismos autores comparan la percolación de pinos y matorrales de *Acacia caven* en los años 2002 y 2003; en el caso de pinos, registraron valores del equivalente al 5% de la precipitación, mientras que en el espino el valor fue de un 51%. En este estudio, para los mismos años, los pinos presentaron una percolación equivalente al 9% de la precipitación y los matorrales el equivalente al 39%.

Galleguillos et al. (2021) hicieron un estudio en la cuenca del río Cauquenes en el Arrayán, usando un modelo a escala de cuenca (SWAT), encontrando montos de ETr anual en pino entre 626 a 751 mm anuales para la cuenca en el periodo de 2006 a 2018; sin embargo, la cuenca que ellos consideraron concentra zonas con mayor relieve, que poseen más precipitaciones que los sitios seleccionados en este estudio, por lo que la vegetación de dicho estudio poseía más agua disponible para evapotranspirar. En ese sentido, en simulaciones consideradas para periodos futuros secos, la ETr mostró valores de hasta 446 mm en sectores de menor disponibilidad hídrica, como aquellos considerados en este estudio. En cuanto a los matorrales, en el mismo estudio se registraron montos medios de 506 mm, pero dichos matorrales también estaban ubicados en zonas de mayor precipitación que en el presente estudio, y además incluyeron en su cobertura a individuos de *Lithraea caustica*, que posee mayores demandas de agua que *Acacia caven* (Bown et al., 2018). Sin embargo, en dicho trabajo también podría haber una sobrestimación del consumo de agua en algunos sitios de matorral, debido a que su escala de análisis es a nivel de cuenca y no a nivel de sitio, como en el presente estudio, por lo que en este trabajo se pueden percibir diferencias más finas en cada sector analizado. Meza et al. (2018) reportó valores de ETr de 128 y 139 mm para los años 2011 y 2012, respectivamente en Los Andes (33°S), con una precipitación de 111 y 155 mm en cada año mencionado. Es difícil comparar dichos valores con lo observado en este trabajo, ya que las precipitaciones de Los Andes son significativamente menores a las observada en Cauquenes.

En cuanto a las tendencias anuales, la ETr ha tendido a disminuir para ambas coberturas desde 1979-2019, siendo solo significativa según el análisis de Mann-Kendall para dos de los sitios de pino (SP y SA). La Per/cap anual muestran una clara tendencia a menores recargas a la napa a partir del 2010, tanto para matorrales como para pinos, siendo significativa solo en matorral CA y pino SA. Esto es coincidente con la megasequía que se experimentó en la zona centro de Chile entre los 30° y 38° S (Garreaud et al., 2020), la que no solo provocó una disminución en las precipitaciones, sino que aumentos en la evapotranspiración potencial en la zona central de Chile, como también disminución de los caudales en los ríos (Garreaud et al., 2017). Todo esto es especialmente importante en cuencas de secano como la de este estudio, en donde las coberturas solo disponen de la entrada de agua como precipitación.

Al analizar las tendencias estacionales de ETr y la Per/cap, hay disminuciones en todas las estaciones del año, independiente del sitio (Figura 14 y Cuadro 9). La ETr de otoño tiende a ser similar para todos los sitios, porque no queda agua en el suelo para sustentar mayores montos de variable independiente de la cobertura. Además, las tendencias muestran que la ETr de otoño ha tenido una disminución significativa (Cuadro 9), debido a que el otoño es la estación más alejada de las precipitaciones del año anterior, y como hay mayores demandas de agua debido al aumento de ETo, el almacenamiento de agua en el suelo se agota antes en la temporada. Luego, en las estaciones que hay más agua disponible como precipitación, se diferencian los consumos de pinos y matorrales, lo que se maximiza en primavera, ya que hay mayor demanda de la atmósfera (ETo) y mayor agua disponible en el suelo para solventar estos montos de ETr. Finalmente, en verano, cuando se empieza a agotar el agua en el suelo, el pino SA accede al agua desde la napa y solventa sus altos montos de ETr, aunque ya se esté agotando el almacenamiento que tenía en el suelo. En cuanto a la Per/cap, las recargas hacia la napa son mayores en invierno y otoño, donde matorrales muestran más aportes que los pinos (Figura 14), sin embargo, esas recargas hacia la napa han tendido a disminuir en dichas estaciones, siendo significativa la disminución de otoño.

2. Proyecciones de la ETr y percolación bajo escenarios futuros de cambio climático

Los montos de ETr y percolación en los escenarios futuros (cuadros 10 y 11) muestran menores valores en los escenarios pesimista y mediano, mientras que en el escenario optimista habría un leve aumento con respecto al escenario de referencia para ambas coberturas. Al analizar ambas variables, la que se vería más afectada sería la percolación, ya que como se sabe, esta depende del agua que entre al sistema (precipitación) y de las salidas (ETr). Así, al haber más demanda atmosférica en el futuro, la ETr será mayor, y en el caso de pinos los valores de percolación podrían llegar a ser nulos en el escenario pesimista, al igual que lo ocurrido en la megasequía (Cuadro 11). Por otra parte, el hecho que disminuya la ETr en el futuro, sería un indicador de que la fijación de carbono se vería perjudicada, al generarse una situación de estrés hídrico; esto se hace aún más importante cuando se considera el tipo de cobertura arbórea utilizada para forestar dentro del objetivo de lograr la carbono neutralidad (NDC, 2020), por lo que es necesario estudiar la fijación de C en pinos frente a un futuro de menor disponibilidad hídrica, ya que ellos están incluidos dentro del plan de forestación para la meta de emisiones netas cero (ver discusión sección III).

En las diferencias relativas de ETr anual entre el periodo de referencia y el futuro, la variable decrecerá tanto en los escenarios pesimista y mediano, mientras que en la simulación optimista la mayoría de los sitios presentará aumentos en una parte de los años del periodo. Al querer encontrar respuesta diferenciadas por cobertura, no se logró constatar comportamientos distintos, sino que hay comportamiento sitio-cobertura diferenciados, como lo ocurrido con matorral LG, que presenta una distribución menos dispersa que los demás y responde notoriamente a los distintos escenarios futuros. Ello se puede deber a matorral LG presenta un perfil con altos contenidos de arena y presencia de intercalaciones de grava, que causan valores de ETr más sensibles a los distintos montos de precipitaciones y ETo, a diferencia del matorral CA, que al tener niveles altos de arcilla en su perfil (apéndices 1 y 2) hacen que la diferencia entre el periodo de referencia con el escenario

mediano y optimista no muestre el mismo aumento que lo experimentado por los otros sitios. Por último, destaca pino SA, debido a que posee una distribución menos dispersa en los escenarios mediano y optimista, ya que posee aportes de capilaridad que seguirá obteniendo de la napa en los distintos escenarios futuros (Cuadro 11).

Respecto a las diferencias relativas de la ETr estacional (Apéndice 11.1), los inviernos con mayores montos de ETr son concordantes con lo que se ha previsto para el futuro en zonas de clima Mediterráneo, ya que se esperan aumentos de la ETo que serán especialmente altos en invierno y primavera (Giorgi, 2006; Moratíel et al., 2011), siendo relevante en sistemas donde históricamente las mayores percolaciones se dan en invierno, como lo visto en los análisis de tendencia del presente estudio (Figura 14), por lo que al haber aumentos de la ETr de invierno, quedará menos agua disponible para ser percolada (Huber y Iroume, 2008).

Al analizar las diferencias relativas de la Per/cap anual entre el periodo de referencia y los escenarios futuros, hay mayor variabilidad entre sitios en comparación a lo ocurrido con la ETr. Por ejemplo, pino SA muestra distribuciones de valores por sobre el resto, ya que, ante escenarios con menor precipitación y mayor ETo, necesitará obtener más agua por capilaridad desde la napa para mantener su ETr por sobre el resto. Por otra parte, matorral CA muestra una distribución mayormente bajo el cero, debido a que los altos niveles de arcilla sin estructura en los últimos horizontes y la baja conductividad hidráulica (Apéndice 2 y Cuadro 5), hacen que la respuesta a los distintos escenarios futuros no sea tan contrastante entre ellos.

III. Efecto del cambio de uso/cobertura de suelo sobre la evapotranspiración real y percolación de la cuenca

El cambio de uso/cobertura de suelo y su efecto en el aumento de la evapotranspiración y disminución de la percolación en los sistemas analizados deja en evidencia la necesidad de considerar los efectos de dicho cambio sobre los recursos hídricos de la zona. El ejercicio de utilizar el cambio en el volumen de ETr y percolación en equivalentes de camiones aljibe y de embalses ayuda a ver el efecto de cambiar una cobertura por otra en la seguridad hídrica de ese lugar, ya que en la cuenca no solo hay matorral espinoso y plantaciones forestales, sino que también otros usos, como las otras coberturas vegetacionales, la agricultura, áreas urbanas, industria, entre otros actores que hacen uso del agua.

Cauquenes es un lugar caracterizado por la agricultura, con cultivos anuales y perennes, destacándose las plantaciones de viñas que generan una importante producción de vinos que históricamente ha estado en manos de pequeños productores (INE, 2007; Arriagada, 2020). Otro uso del agua lo constituyen la utilizada por la población que no tiene acceso a la red pública, sino que usan fuentes informales, principalmente de norias o pozos, ríos o vertientes y en ocasiones reciben abastecimiento desde camiones aljibe (Fundación Amulén, 2019; Subdere, 2019). En este contexto, se hace relevante señalar que la región del Maule se ha visto fuertemente afectada por las sequías que han ocurrido en los últimos años, siendo una de las regiones de Chile con las mayores cantidades de declaraciones de escasez hídrica

emitidas por la Dirección General de Agua, concentrando a la vez los mayores gastos en abastecimiento de agua a través de camiones aljibe (CR2, 2015).

En los eventos de sequía es cuando con mayor relevancia se ve el efecto del cambio de uso/cobertura, ya que, en años de sequía extrema, como la ocurrida en 1998, el cambio en la ETr hacia el nivel de consumo de las plantaciones de pino en el área involucrada hubiera generado alrededor 8,8 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ extra de agua saliendo del sistema y un decrecimiento de la percolación de 5,8 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$. Además, en los escenarios futuros, con aumento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones, Vicuña et al. (2010) estiman disminuciones en los caudales medios anuales de los cauces en mayor magnitud que el decrecimiento que sufrirán las precipitaciones, debido a las mayores pérdidas por evaporación al haber mayores temperaturas. En esa misma línea, Bozkurt et al. (2018) estiman que la escorrentía disminuirá en un 40% en el escenario de cambio climático RCP 8.5, por lo que al haber menos escorrentía, habrá menos agua en los ríos y ello tendrá un efecto directo en los usuarios de esas aguas, como es el caso de la agricultura (Pino et al., 2015), en particular Cauquenes, donde la pequeña agricultura se abastece mayormente de agua superficial, con riegos pocos tecnificados, serán aún más vulnerables de lo que son en la actualidad. En ese contexto futuro de escasez de agua, toman sentido las magnitudes del cambio en los volúmenes de agua de la ETr y percolación que generan las plantaciones.

Es importante señalar que en este estudio solo se consideró el cambio actual de haber reemplazado áreas de matorral espinoso por plantación de pino, por lo que, en un futuro, si la política forestal actual sigue en curso, los cambios en los volúmenes de agua que no quedan disponibles dentro del sistema debido a la mayor ETr y menor percolación, podrían ser aún mayores. Otro punto por considerar es que para estimar el cambio en los volúmenes de agua que salen del sistema, se consideró el área donde debería situarse el bosque espinoso mediterráneo que actualmente es el Espinal, pero las zonas colindantes, que correspondían en el pasado a bosque esclerófilo mediterráneo interior de *Lithrea caustica* y *Peumus boldus* (Anexo 2), también han sido ampliamente degradadas, y en la actualidad están en estado de vulnerabilidad (Alaniz et al., 2016). En esta condición, el Espinal se expandió hacia esas áreas, y si se consideraran las plantaciones que reemplazan al Espinal de esos sitios, los montos de agua adicional reportados en este estudio podrían ser más altos.

El cambio de uso/cobertura estudiado no solo ha tenido consecuencias en la mayor demanda de agua, sino también, en otros aspectos. Por ejemplo, en el verano del 2017 ocurrió uno de los incendios más devastadores que ha vivido la zona, abarcando alrededor de 52.000 ha, que corresponden al 18% de la superficie de la comuna de Cauquenes y que afectaron a 340 agricultores del sector apícola, pecuario, cultivos de viñas, praderas y plantaciones forestales (INDAP, 2017). El riesgo de incendio se concentra en territorios dominados por plantaciones forestales, ya que estas coberturas exóticas agravan la intensidad y magnitud de dichas catástrofes, debido a que poseen una alta biomasa que actúa como combustible, con baja humedad, mayor concentración de compuestos volátiles y un alto poder calorífico en comparación a la vegetación nativa (González et al., 2020). Se ha visto que durante la megasequía (2010-2019) se produjo un aumento en un 30% de las áreas quemadas por sobre el promedio histórico, por lo que, frente a un escenario futuro con mayores temperaturas y bajas precipitaciones, que causen bajos contenidos de aguas en el suelo y estrés hídrico en la vegetación, junto a condiciones favorables para estos eventos y la falta de gestión en el uso

del territorio, se prevé un aumento de mega incendios (Urrutia-Jalabert et al., 2018; Moreira et al., 2019; González et al., 2018).

Un aspecto fundamental por considerar es que Chile se ha impuesto como meta lograr la carbono neutralidad en el año 2050, todo ello dentro de las estrategias para limitar el calentamiento global a 1,5°C en base al acuerdo de París (NDC, 2020). Una de las medidas para ser carbono neutral es aumentar la captura CO₂ a través de la vegetación. La Corporación Chilena de la Madera hizo su propuesta hacia una forestación “con todo tipo de especies, de manera productiva y para cobertura permanente” (CORMA, 2020). En la misma línea, la última actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile (NDC, 2020), menciona que al año 2030 se forestarán 200.000 ha, pero de ellas 130.000 ha podrían ser plantaciones exóticas y solo 100.000 ha del total serían permanentes, usando suelos de “aptitud preferentemente forestal”. En contraparte al NDC, Pica-Téllez et al. (2020) comentan que esta medida no es recomendable, debido a los efectos negativos asociados a las plantaciones en el ciclo hidrológico, manejo del fuego, la biodiversidad y los sistemas socio-ecológicos donde se ubican.

Las decisiones que se tomen para llegar a la meta de carbono neutralidad es un tema económico, político y social que se determinará según las prioridades y visiones nacionales de desarrollo (Rankovic et al., 2018). Actualmente se está llevando la discusión de la Ley de Cambio Climático en el congreso; paralelamente la comunidad científica ha expresado que este tema debe abordarse de una visión holística e intersectorial, para poder lograr la transición hacia una economía con baja huella de carbono (CR2, 2020). Esto es especialmente importante en zonas como Cauquenes, que presenta importantes brechas en su nivel de desarrollo y bienestar con respecto al resto del país (Subdere, 2019), por lo que los cambios de uso/cobertura de suelo deben considerar una planificación territorial y gestión de los recursos hídricos de las cuencas que aseguren el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por Naciones Unidas (Anexo 15) y a los que Chile se ha comprometido, como los que dicen relación sobre garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua, proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, detener y revertir la degradación de la tierra, frenar la pérdida de diversidad biológica y fomentar el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible.

CONCLUSIONES

El estudio permitió implementar el modelo de transferencias hídricas HYDRUS-1D de forma satisfactoria, lo que fue contrastado con mediciones de contenido de agua en el suelo ($R^2 > 0,9$, $KGE > 0,85$ y $PBIAS < 10\%$) así como de transpiración ($R^2 > 0,7$, $KGE > 0,55$ y $PBIAS < 15\%$) en coberturas de matorral espinoso y plantaciones de pino. Esto permitió caracterizar la dinámica del balance hídrico en periodos pasados, presentes y futuros en los sitios de estudio.

La evapotranspiración real y percolación históricas (1979-2019) han tenido un decrecimiento en ambas coberturas, la ETr en matorrales ha disminuido entre $0,86$ a $1,1$ mm año^{-1} y en pinos entre $1,2$ a $1,9$ mm año^{-1} , mientras que la percolación decreció entre $3,2$ a $4,4$ mm año^{-1} en matorral y entre $0,31$ a $2,81$ mm año^{-1} en pinos. En cuanto a los análisis estacionales, se vio que en general en otoño las disminuciones fueron significativas tanto para la ETr como en la percolación. También se constató una disminución importante de ETr desde 2010, cuando empezó la megasequía (2010-2019) en la zona central de Chile, disminuyendo los montos de ETr en 22 mm ($6,4\%$) en matorral y en 27 mm (5%) en pinos. Más abrupto fue lo que ocurrió con la percolación, ya que en matorral los montos bajaron en 107 mm año^{-1} y en pino disminuyeron en 80 mm año^{-1} , llegando a ser casi nulos los aportes a la napa.

Al analizar el efecto del cambio climático futuro (2020-2046), se vio que ambas coberturas decrecerán sus ETr y percolaciones en los escenarios pesimista y mediano, mientras que el optimista la mayoría mostraría un cierto aumento en las variables analizadas. Pino San Agustín que es el único sitio con presencia de napa freática, accedería a mayores aportes desde ésta a través de la capilaridad, tanto en la megasequía como en los escenarios pesimista y mediano, pudiendo solventar sus altos valores de ETr que tiene por sobre el resto. En cuanto a las diferencias en los comportamientos de pino y matorral, si bien ambos bajarán sus ETr y percolaciones con respecto a lo visto en el periodo de referencia, las magnitudes indican que los pinos en el escenario pesimista tendrían nulos aportes a la napa, mientras que los matorrales seguirían aportando entre 54 a 316 mm año^{-1} .

A modo general, independiente del periodo analizado, se encontró que las coberturas de pinos analizadas evapotranspiran entre 180 a 214 mm año^{-1} más que las coberturas de matorral, y que estos últimos aportan a la napa entre 184 a 237 mm año^{-1} más que las plantaciones. Estos valores, al analizarlos en el área que han ocupado las plantaciones donde previamente había matorral (7.751 ha), generan entre $15,7$ a $19,0$ millones de m^3 año^{-1} adicional de ETr saliendo del sistema (entre $1,5$ - $1,9$ millones de camiones aljibe año^{-1} o a $1,2$ - $1,5$ embalses Tutuvén año^{-1}), y ha disminuido la percolación entre $14,8$ a $18,4$ millones de m^3 año^{-1} ($1,4$ - $1,8$ millones de camiones aljibe año^{-1} o a $1,1$ - $1,4$ embalses Tutuvén año^{-1}) por el mayor consumo de agua de estas coberturas.

Frente al desafío del país para optar hacia la carbono neutralidad, se espera que las plantaciones sigan expandiéndose, pero los montos reportados en este estudio y la escasez de agua que ya se vive y que se vivirá de forma más severa que la actual, impone desafíos que deberían ir enfocados hacia una planificación territorial efectiva, que permita garantizar los desafíos globales de desarrollo sostenible a los que Chile se ha comprometido.

LITERATURA CITADA

- Adane, Z.A., P. Nasta, V. Zlotnik, and D. Wedin. 2018. Impact of grassland conversion to forest on groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 15:171-183.
- Alaniz, A.J., M. Galleguillos, and J.F. Perez-Quezada. 2016. Assessment of quality of input data used to classify ecosystems according to the IUCN Red List methodology: The case of the central Chile hotspot. *Biological Conservation* 204:378-385.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food and Agriculture Organization (FAO) de las Naciones Unidas. Roma, Italia. Disponible en <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf> (Consultado en marzo 2021).
- Armesto, J.J., and S.T. Pickett. 1985. A mechanistic approach to the study of succession in the Chilean matorral. *Revista Chilena de Historia Natural* 58:9-17.
- Arriagada, C. 2020. Cauquenes, rincón vitivinícola del Maule. (Bol. Tec. N°418), INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). Villa Alegre, Chile: INIA. <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/6906> (Consultado en marzo de 2021).
- Batalha, M.S., M.C. Barbosa, B. Faybishenko, and M.Th. van Genuchten. 2018. Effect of temporal averaging of meteorological data on predictions of groundwater recharge. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 66(2):143-152.
- Beck, H.E., N.E. Zimmermann, T.R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, and E.F. Wood. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5(1):1-12.
- Bennett, N.D., B.F. Croke, G. Guariso, J.H. Guillaume, S.H. Hamilton, A.J. Jakeman, et al. 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software* 40:1-20.
- Bio-Science. 2018. Operations Manual, Plant Canopy Imager CI-110. Washington D.C., USA. Disponible en <https://au.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/CI-110-Manual-1.pdf> (Consultado en marzo 2021).
- Boisier, J.P., R. Rondanelli, R.D. Garreaud, and F. Muñoz. 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters* 43:413-421.
- Bown, H.E., J.P. Fuentes, and A.M. Martínez. 2018. Assessing water use and soil water balance of planted native tree species under strong water limitations in Northern Chile. *New Forest* 49:871-892.
- Bozkurt, D., M. Rojas, J. Boisier, and J. Valdivieso. 2018. Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change* 150:131-147.
- Braden, H. 1985. Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell for Wasser und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzer Einzugsgebiete. *Mittelungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft* 42:294-299.
- Bravo, P. 2001. Geología del borde oriental de la Cordillera de la Costa entre los ríos Mataquito y Maule, VII Región. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile. 124 h.
- Brunetti, G., J. Simunek, and P. Piro. 2016. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology* 540:1146-1161.

- Brunetti, G., J. Simunek, M. Turco, and P. Piro. 2017. On the use of surrogate-based modeling for the numerical analysis of Low Impact Development techniques. *Journal of Hydrology* 548:263-277.
- Carsel, R.F., and R.S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research* 24(5):755-769.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1997. Estudio Agrológico, Descripción de suelos materiales y símbolos: VII Región (Publicación N° 117).
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2013. CONAF, por un Chile forestal sustentable. Santiago, Chile. Disponible en http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1382992046CONAFporunChileForestalSustentable.pdf (Consultado en marzo 2021).
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016. Política forestal 2015-2035. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Santiago, Chile. Disponible en https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1462549405politicaforestal201520351.pdf (Consultado en marzo 2021).
- CORMA (Corporación Chilena de La Madera). 2015. El Agua Y Las Plantaciones Forestales. Disponible en <https://www.corma.cl/wp-content/uploads/2020/01/El-agua-y-las-plantaciones-forestales.pdf> (Consultado en marzo 2021).
- CORMA (Corporación Chilena de La Madera). 2020. Memoria Anual 2019/2020. Disponible en http://www.corma.cl/wp-content/uploads/2020/10/CORMA_2020.pdf (Consultado en marzo 2021).
- CR2 (Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia). 2015. Identificación de Reformas Legales para alcanzar la meta de carbono neutralidad en Chile al 2050. Santiago, Chile. Disponible en <http://leycambioclimatico.cl/wp-content/uploads/2020/04/Informe-Reformas-Legales-para-alcanzar-la-carbono-neutralidad.pdf> (Consultado en marzo 2021).
- CR2 (Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia). 2020. Informa a la Nación: La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Santiago, Chile. Disponible en <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf> (Consultado en marzo 2021).
- Crockford, R.H., and D.P. Richardson. 1990. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: IV The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation. *Hydrological Processes* 4(2):169-188.
- DeFries, R., J. Foley, and G.P. Asner. 2004. Land use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2:249-257.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2011. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Cauquenes. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Diamantopoulos, E., S.C. Iden and W. Durner. 2012. Inverse modeling of dynamic nonequilibrium in water flow with an effective approach. *Water Resources Research* 48(3):1-16.
- Etana, A., M. Larsbo, T. Keller, J. Arvidsson, P. Schjønning, J. Forkman, and N. Jarvis. 2013. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma* 192:430-436.
- Falvey, M., and R. Garreaud. 2009. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979 – 2006). *Journal of Geophysical Research* 114:1-16.

- Fassnacht, F.E., J. Poblete-Olivares, L. Rivero, J. Lopatin, A. Ceballos-Comisso, and M. Galleguillos. 2021. Using Sentinel-2 and canopy height models to derive a landscape-level biomass map covering multiple vegetation types. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 94:1-12.
- Farley, K.A., E.G. Jobbagy, and R.B. Jackson. 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11:1565-1576.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik, and H. Zaradny. 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Fierro, P., L. Pancel, H. Rivera, y J.C. Castillo. 1998. Experiencia silvicultural del bosque nativo de Chile: recopilación de antecedentes para 57 especies arbóreas y evaluación de prácticas silviculturales. Corporación Nacional Forestal (CONAF), Santiago, Chile.
- Foley, J.A., M.H. Costa, C. Delire, N. Ramankutty, and P. Snyder. 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1(1):38-44.
- Foley, J.A., R. DeFries, G.P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S.R. Carpenter, et al. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309:570-574.
- Fuentes, I. 2013. Soil hydraulics associated with soil physical properties and their effect on nitrate leaching in the Mediterranean zone of Chile. Tesis Magíster. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 124 h.
- Fundación Amulén. 2019. Pobres de agua, radiografía del agua rural de Chile: visualización de un problema oculto. Centro de Derecho y Gestión de Aguas y Centro de Cambio Global, Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en <https://cambioglobal.uc.cl/proyectos/289-pobres-de-agua-radiografia-del-agua-rural-en-chile> (Consultado en marzo 2021).
- Galleguillos, M., F. Gimeno, C. Puelma, M. Zambrano-Bigiarini, A. Lara, and M. Rojas. 2021. Disentangling the effect of future land use strategies and climate change on streamflow in a Mediterranean catchment dominated by tree plantations. *Journal of Hydrology* 595:1-17.
- Garreaud, R., C. Álvarez-Garretón, J. Barichivich, J.P. Boisier, D. Christie, M. Galleguillos, et al. 2017. The 2010 – 2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences* 21:6307-6327.
- Garreaud, R., C. Álvarez-Garretón, J. Barichivich, J.P. Boisier, D.A. Christie, M. Galleguillos, et al. 2017. The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences* 21:6307-6327.
- Garreaud, R.D., J.P. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H.H. Sepúlveda, and D. Veloso-Aguila. 2020. The Central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40(1):421-439.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot spots. *Geophysical Research Letters* 33(8):1-4.
- Giorgi, F., and P. Lionello. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63:90-104.
- González M.E., S. Gómez-González, A. Lara, R. Garreaud, and I. Díaz-Hormazábal. 2018. The 2010-2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and southcentral Chile. *Ecosphere* 9(8):1-17.
- González, M.E., R. Sapiains, S. Gómez-González, R. Garreaud, A. Miranda, M. Galleguillos, et al. 2020. Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y

- Universidad Austral de Chile. Disponible en <http://www.cr2.cl/incendios/> (Consultado en marzo 2021).
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 42(2):193-200.
- Grimm, U., y H. Fassbender. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela III: Ciclo Hidrológico y traslocación de elementos químicos con el agua. *Turrialba* 31(2):89-99.
- Grinevskii, S.O. 2011. Modeling root water uptake when calculating unsaturated flow in the vadose zone and groundwater recharge. *Moscow University Geology Bulletin* 66(3):189-201.
- Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz, and G.F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377(1-2):80-91.
- Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2):96-99.
- Hassan, R., R. Scholes, and N. Ash. 2005. *Ecosystems and human well-being: current state and trends*. Island Press, Washington DC, USA.
- Hossain, S., G.A. Hewa, and S. Wella-Hewage. 2019. A Comparison of Continuous and Event-Based Rainfall-Runoff (RR) Modelling Using EPA-SWMM. *Water* 11(3):1-34.
- Huber, A., A. Iroumé, and J. Bathurst. 2008. Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes* 22(1):142-148.
- Huber, A., y R. Trecaman. 2004. Eficiencia del uso del agua en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque* 25(3):33-43.
- Huber, A., y R. Trecaman. 2000. Efecto de una plantación de *Pinus radiata* en la distribución espacial del contenido de agua del suelo. *Bosque* 21(1):37-44.
- INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario). 2017. Informe Ejecutivo Emergencia por Incendios Forestales. Santiago, Chile. Disponible en <https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/5--ver-informe-ejecutivo-emergencia-por-incendios-forestales-regi%C3%B3n-del-maule.pdf?sfvrsn=0> (Consultado e marzo 2021).
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2007. Censo Agropecuario y Forestal. Instituto Nacional de Estadísticas.
- INFOR (Instituto Forestal). 2017. Anuario Forestal 2017. (Bol. Tec. N°159), INFOR. Santiago, Chile: INFOR.
- IPCC. 2000. *Land Use, Land Use Changes and Forestry*. Cambridge University Press, England. Disponible en <https://www.ipcc.ch/report/land-use-land-use-change-and-forestry/> (Consultado en marzo 2021).
- Kabat, P., M. Claussen, P.A. Dirmeyer, J.H.C. Gash, L. Bravo de Guenni, M. Meybeck, et al. 2004. *Vegetation, water, humans, and the climate: A new perspective on an interactive system*. Springer, Berlin, Alemania.
- Kasperson, J.X., and R.E. Kasperson. 2012. *Social Contours of Risk*. Routledge, London, England.
- Kendall, M.G. 1975. *Rank Correlation Methods*. Griffin, London, England.
- Knoche, D. 2005. Effects of stand conversion by thinning and underplanting on water and element fluxes of a pine ecosystem (*P. sylvestris* L.) on lignite mine spoil. *Forest Ecology and Management* 212(1-3):214-220.

- Lambin, E.F., X. Baulies, N. Bockstael, G. Fischer, T. Krug, R. Leemans, et al. 1999. Land-use and land-cover change (LUCC): Implementation strategy. (Tech. rep. N°48), International Geosphere-Biosphere Programme Secretariat (IGBP). Stockholm, Sweden.
- Lara, A., C. Little, R. Urrutia, J. McPhee, C. Alvarez-Garreton, C. Oyarzún, et al. 2009. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management* 258:415-424.
- Lara, A., M.E. Solari, M.D.R. Prieto, y M.P. Peña. 2012. Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35°-43° 30 S). *Bosque* 33(1):13-23.
- Lee, R. 1980. *Forest Hydrology*. Columbia University Press, New York, USA.
- Li, M.F., X.P. Tang, W. Wu, and H.B. Liu. 2013. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy Conversion and Management* 70:139-148.
- Little, C., A. Lara, J. McPhee, and R. Urrutia. 2009. Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology* 374(1-2):162-170.
- Lu, P., L. Urban, and P. Zhao. 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica* 46(6):631-646.
- Luebert, F., y P. Pliscoff. 2006. *Sinopsis Climática y Vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Luzio, W., M. Casanova y O. Seguel. 2010. *Suelos de Chile*. (Luzio, W. Ed.). Editorial MAVAL, Santiago, Chile.
- Maetens, W., M. Vanmaercke, J. Poesen, B. Jankauskas, G. Jankauskiene, and I. Ionita. 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A metaanalysis of plot data. *Progress in Physical Geography* 36(5):599-653.
- Macari, O. 2019. Elaboración de un índice de condición ecosistémica que incorpore el factor edáfico, como instrumento para la determinación de costos de medidas de restauración. Proyecto de Grado de Magíster. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago, Chile. 148 h.
- Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245-259.
- Mariotti, A., Y.T. Pan, N. Zeng and A. Alessandri. 2015. Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Climate Dynamics* 44:1437-1456.
- Martínez, R. 2004. Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Región del Bío-Bío (sector sur). Memoria. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 153 h.
- McCuen, R.H., Z. Knight, and A.G. Cutter. 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *Journal of Hydrologic Engineering* 11(6):597-602.
- Mead, D.J. 2013. Sustainable management of *Pinus radiata* plantations. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Rome, Italy. Disponible en <http://www.fao.org/3/i3274e/i3274e.pdf> (Consultado en noviembre de 2018).
- Meza, F.J., C. Montes, F. Bravo-Martínez, P. Serrano-Ortiz, and A.S Kowalski. 2018. Soil water content effects on net ecosystem CO₂ exchange and actual evapotranspiration in a Mediterranean semiarid savanna of Central Chile. *Scientific Reports* 8(1):1-11.
- Min, S.K., X. Zhang, F.W. Zwiers, and G.C. Hegerl. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature* 470(7334):378-381.

- MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo). 2012. Plan Regulador Intercomunal de Cauquenes, Chanco y Pelluhue Región del Maule. Santiago, Chile.
- Miranda, A., A. Altamirano, L. Cayuela, A. Lara, and M. González. 2017. Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence. *Regional Environmental Change* 17(1):285-297.
- Moratiel, R., R.L. Snyder, J.M. Durán, and A.M. Tarquis. 2011. Trends in climatic variables and future reference evapotranspiration in Duero Valley (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11:1795-1805.
- Moreira, F., D. Ascoli, H. Safford, M.A. Adams, J.M. Moreno, J.M. Pereira, et al. 2020. Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed. *Environmental Research Letters* 15(1):1-6.
- Moriasi, D.N., B.N. Wilson, K.R. Douglas-Mankin, J.G. Arnold, and P.H. Gowda. 2012. Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4):1241-1247.
- Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900.
- Moriasi, D.N., M.W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati. 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6):1763-1785.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3):513-522.
- Muleta, M.K. 2012. Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(6):756-767.
- Muñoz-Carpena, R. 2004. Field devices for monitoring soil water content. University of Florida, IFAS Extension. Florida, USA. Disponible en <https://edis.ifas.ufl.edu/ae266> (Consultado en marzo 2021).
- NDC. 2020. Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile (NDC). Gobierno de Chile. Santiago, Chile. Disponible en https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf (Consultado en marzo 2021).
- Norman, J.M., and G. Campbell. 1989. Canopy structure. p. 301-325. *In*: Pearcy, R., J. Ehleringer, H. Mooney and P. Rundel. *Plant physiological ecology: field methods and instrumentation*. Chapman and Hall, New York, USA.
- Ovalle, C., A. Del Pozo, M.A. Casado, B. Acosta, and J.M. de Miguel. 2006. Consequences of landscape heterogeneity on grassland diversity and productivity in the Espinal agroforestry system of central Chile. *Landscape Ecology* 21(4):585-594.
- Oyarzún, C., and A. Huber. 1999. Balance hídrico en plantaciones jóvenes *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. *Bosque* 6(1):3-14.
- Oyarzún, C., L. Nahuelhual, y D. Núñez. 2005. Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo* 20(3):88-95.
- Pathak, P., S.P. Wani, and R.R. Sudi. 2011. Long term effects of management systems on crop yield and soil physical properties of semi-arid tropics of Vertisols. *Agricultural Sciences* 2(4):435-442.
- Petitpas, R., J.T. Ibarra, M. Miranda, y C. Bonacic. 2016. Patrones espaciales en un período de 24 años muestran un caso de aumento de la vegetación nativa y disminución de la

- fragmentación en los paisajes templados andinos, Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 43(3):384-395.
- Pica-Télez, A., S. Vicuña E. Bustos, L. Cifuentes, F. Meza, H. Gilabert, et al. 2020. Análisis de la nueva Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de Chile ante la CMNUCC. Centro de Cambio Global UC. Disponible en [https://cambioglobal.uc.cl/images/opinion/Analisis_propuesta Nueva NDC Chile CC G-UC 23 Abril vfinal.pdf](https://cambioglobal.uc.cl/images/opinion/Analisis_propuesta_Nueva_NDC_Chile_CC_G-UC_23_Abril_vfinal.pdf) (Consultado en marzo 2021).
- Pielke R.A., R. Avissar, M.R. Raupach, A.J. Dolman, X. Zeng, and A.S. Denning. 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: Influence on weather and climate. *Global Change Biology* 4(5):461-475.
- Pielke, R.A., and R. Avissar. 1990. Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology* 4(2-3):133-155.
- Pielke, R.A., G. Marland, R.A. Betts, T.N. Chase, J.L. Eastman, J.O. Niles, and S.W. Running. 2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Physical and Engineering Sciences* 360(1797):1705-1719.
- Pino, P., V. Iglesias, R. Garreaud, S. Cortés, M. Canals, W. Folch, et al. 2015. Chile confronts its environmental health future after 25 years of accelerated growth. *Annals of Global Health* 81(3):354-367.
- Polade, S.D., D.W. Pierce, D.R. Cayan, A. Gershunov, and M.D. Dettinger. 2014. The key role of dry days in changing regional climate and precipitation regimes. *Scientific Reports* 4(1):1-8.
- Prado, J.A. 2015. Plantaciones Forestales, más allá de los árboles. Colegio de Ingenieros Forestales de Chile A.G., Santiago, Chile.
- Putuhena, W.M., and I. Cordery. 2000. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology* 100(1):59-72.
- Quilbé, R., A.N. Rousseau, J.S. Moquet, N.B. Trinh, Y. Dibike, P. Gachon, and D. Chaumont. 2008. Assessing the effect of climate change on river flow using general circulation models and hydrological modelling—Application to the Chaudière River, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 33(1):73-94.
- Rabbel, I., H. Bogen, B. Neuwirth, and B. Diekkrüger. 2018. Using sap flow data to parameterize the Feddes water stress model for Norway spruce. *Water* 10(3):1-19.
- Rankovic, A., M. Colombier, A. Rüdinger, M.H. Schwoob, O. Sartor, S. Treyer, et al. 2018. La neutralité carbone, défis d'une ambition planétaire. *IDDRI Study* 10:1-42.
- Rassam, D., J. Simunek, D. Mallants, and M.Th. van Genuchten. 2018. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media: Tutorial, Version 1.00. CSIRO Land and Water, Clayton, Australia.
- Ritter, A., and R. Muñoz-Carpena. 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480:33-45.
- Roger, M. 2005. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Sala, O.E., F.S. Chapin, J.J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, et al. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287(5459):1770-1774.

- Salazar, A., J. Katzfey, M. Thatcher, J. Syktus, K. Wong and C. McAlpine. 2016. Deforestation changes land-atmosphere interactions across South American biomes. *Global and Planetary Change* 139:97-108.
- Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, T., F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, et al. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas, y D. Rivera. 2012. *Métodos de análisis físicos de suelos*. Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales N°5, Chillán, Chile.
- Santander, D. 2020. Informe de actividades práctica profesional Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) en contexto hídrico, cuenca de Cauquenes. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.
- Schaap, M.G., and M.Th. van Genuchten. 2006. A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal* 5:27-34.
- Schaap, M.G., F.J. Leij, and M.Th. van Genuchten. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251(3-4):163-176.
- Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, and E.C. Benham. 2012. *Soil Survey Staff, Field book for describing and sampling soils, V. 3.0*, NRCS-National Soil Survey Center. Lincoln, Nebraska, USA.
- Schröder, N., N. Lazarovitch, J. Vanderborght, H. Vereecken, and M. Javaux. 2014. Linking transpiration reduction to rhizosphere salinity using a 3D coupled soil-plant model. *Plant and Soil* 377(1):277-293.
- Sellers, P.J. 1992. Biophysical models of land surface processes. p. 451–490. *In*: Trenberth K (ed.). *Climate system modelling*. Cambridge University Press, London, England.
- Seong, C., Y. Her, and B.L. Benham. 2015. Automatic Calibration Tool for Hydrologic Simulation Program-FORTRAN Using a Shuffled Complex Evolution Algorithm. *Water* 7(2):503-527.
- Sepúlveda, M.M., H.E. Bown, and L.B. Fernandez. 2018. Stomatal conductance responses of *Acacia caven* to seasonal patterns of water availability at different soil depths in a Mediterranean Savanna. *Water* 10(11):1-20.
- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). 2003. *Mapa Geológico de Chile: versión digital*. Geológica Digital N°4. Santiago, Chile. Esc. 1:1.000.000. Disponible en <http://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-millon.pdf> (Consultado en marzo de 2021).
- Shelia, V., J. Simunek, K. Boote, and G. Hoogenboom. 2018. Coupling DSSAT and HYDRUS-1D for simulations of soil water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 66(2):232-245.
- Simunek, J., and M.Th. Van Genuchten. 1999. Using the HYDRUS-1D and HYDRUS-2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solute transport parameters. U.S. Salinity Laboratory, USDA, Riverside, USA. Disponible en https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/20360500/pdf_pubs/P1667.pdf (Consultado en marzo de 2021).
- Simunek, J., and M.Th. van Genuchten. 2008. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal* 7(2):782-797.
- Simunek, J., M. Sejna, H. Saito, M. Sakai and M.Th. van Genuchten. 2013. *The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and*

- multiple solutes in variably saturated media, University of California-Riverside. Research Reports 3:1-343.
- Simunek, J., N.J. Jarvis, M.Th. van Genuchten and A. Gardenas. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology* 272:14-35.
- Smith, M., A. Segeren, L. Santos-Pereira, A. Perrier, and R. Allen. 1991. Report on the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. Rome, Italy.
- Sobol, I.M. 1993. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiment* 1:407-414.
- Sobol, I.M. 2001. Global sensitivity indices for rather complex mathematical models can be efficiently computed by Monte Carlo (or quasi-Monte Carlo) methods. *Mathematics and Computers in Simulation* 55:271-280.
- Song, X., J. Zhang, C. Zhan, Y. Xuan, M. Ye, and C. Xu. 2015. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology* 523:739-757.
- Subdere (Subsecretaria de Desarrollo Regional y Administrativo). 2019. Plan De Desarrollo Para Zonas Rezagadas “Secano Maule Sur” 2019 – 2022, comunas de Cauquenes-Chanco-Pelluhue-Empedrado. Disponible en http://territoriosdeconvergencia.subdere.gov.cl/files/doc_zonas_rezagadas/Plan%20aprobado.pdf (Consultado en marzo 2021).
- Thanapakpawin, P., J. Richey, D. Thomas, S. Rodda, B. Campbell, and M. Logsdon. 2006. Effects of land use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. *Journal of Hydrology* 334: 215-230.
- Trimble, S.W., and P. Crosson. 2000. US soil erosion rates-Myth and reality. *Science* 289:248-250.
- Turner, B.L. II. Clark, W.C. Kates, R.W. Richards, J.F. Mathews, and J.T. Meyer. 1990. *The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere Over the Past 300 Years*. CUP Archive, Cambridge, England.
- Turner, B.L., R.E. Kasperson, P.A. Matson, J.J McCarthy, R.W. Corell, L. Christensen, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis insustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100: 8074–8079.
- Uribe, S.V., C.F. Estades, and V.C. Radeloff. 2020. Pine plantations and five decades of land use change in central Chile. *Plos One* 15(3):1-16.
- Urrutia-Jalabert, R., M. González, Á. González-Reyes, A. Lara, and R. Garreaud. 2018. Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere* 9(4):1-17.
- Van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, et al. 1997. Theory of SWAP version 2.0, simulation of water flow, solute transport, and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. (Tech. rep. N°71), Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University. Wageningen, the Netherlands.
- Van Genuchten, M.Th. 1987. A Numerical Model for Water and Solute Movement in and Bellow the Root Zone. (Unpublished Research Report), U.S. Salinity Laboratory, USDA. California, USA.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5):892-898.

- Van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S Environmental Protection Agency, Oklahoma, USA.
- Vertessy, R.A., F.G. Watson, and K.O. Sharon. 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecology and Management* 143(1-3):13-26.
- Vicencio, J., C. Cortes, y J. Crespo. 2017. Informe Especial Verano en Chile, Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada. Dirección Meteorológica de Chile, Santiago, Chile.
- Vicuña, S., R. Garreaud, and J. McPhee. 2010. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change* 105(3):469-488.
- Von Hoyningen-Hüne, J. 1983. Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen. *Schriftenreihe des DVWK* 57:1-53.
- Ward, A., and S. Trimble. 2004. *Environmental hydrology*. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- Watson, A., and C. O'Loughlin. 1990. Structural root morphology and biomass of three age-classes of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 20(1):97-110.
- Weiss, M., and F. Baret. 2016. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Avignon, Francia.
- White, D.A., R.P. Silberstein, F. Balocchi-Contreras, J.J. Quiroga, and P. Ramírez de Arellano. 2020. Contribution of advanced regeneration of *Pinus radiata* D. Don. to transpiration by a fragment of native forest in Central Chile is out of proportion with the contribution to Sapwood Area. *Forests* 11(2):1-12.
- Yang, Y., H. Guan, J.L. Hutson, H. Wang, C. Ewenz, S. Shang, et al. 2013. Examination and parameterization of the root water uptake model from stem water potential and sap flow measurements. *Hydrological Processes* 27(20):2857-2863.
- Zambrano-Bigiarini, M. 2020. Package 'hydroGOF', Goodness-of-fit Functions for Comparison of Simulated and Observed. Disponible en <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/hydroGOF.pdf> (Consultado en marzo de 2021).
- Zeng, W., G. Lei, Y. Zha, Y. Fang, J. Wu, and J. Huang. 2018. Sensitivity and uncertainty analysis of the HYDRUS-1D model for root water uptake in saline soils. *Crop and Pasture Science* 69(2):163-173.
- Zhao, Y., D. Feng, L. Yu, X. Wang, Y. Chen, Y. Bai, et al. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment* 183:170-185.
- Zimmermann, B., H. Elsenbeer, and J. De Moraes. 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222:29-38.

APÉNDICES

Apéndice 1.1. Descripciones de las características físicas y morfológicas de los perfiles.

Calicata 1. Descripción del perfil de suelo en el sitio Matorral La Granja.

| Profundidad (cm) | |
|---------------------------|---|
| 0 -9 A ₁ | Pardo amarillento oscuro (10YR 3/4); franco arenosa fino; no adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos moderados; raíces finas comunes; poros finos abundantes; límite ondulado claro. |
| 9-19 2A ₂ | Pardo amarillento (10YR 5/6); arenosa; no adhesivo y no plástico; grano simple; raíces finas comunes; poros finos abundantes; límite lineal abrupto. |
| 19-60 2A ₃ | Variado con dominancia de pardo amarillento (10YR 5/6 a 5/8); areno gravoso; no adhesivo y no plástico; grano simple con tendencia a bloques subangulares finos débiles; raíces finas y medias pocas; poros finos abundantes, medios comunes; grava de cuarzo angular fina en un 20%; límite lineal abrupto. |
| 60-85 3B ₁ | Pardo (7.5YR 4/3) matriz en un 60%; franco arcillo arenosa; moderadamente adhesivo y moderadamente plástico; bloques subangulares finos y medios moderados; raíces finas y medias pocas; poros finos abundantes, medios pocos; rangos redox medios y gruesos contrastantes y nítidos abundantes de color rojo oscuro (2.5 YR 3/6) y negro (GLEY 1N 2.5/0); límite lineal gradual. |
| 85-124 3B ₂ | Pardo grisáceo (10YR 5/2) en un 80% de la matriz; franco arenosa; no adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos y medios débiles; raíces medias y gruesas pocas; poros finos abundantes; rangos redox medios abundantes de color rojo oscuro (2.5YR 3/6) y negro (GLEY 1N 2.5/0); límite lineal claro. |
| 124-170+ BC | Pardo grisáceo (10YR 5/2) en un 50% de la matriz; areno francosa; no adhesivo y no plástico; bloques subangulares finos débiles; raíces gruesas pocas; poros finos abundantes, medios comunes; masas de manganeso finos y medios abundantes de color negro (GLEY 1N 2.5/0). |

Observaciones:

Horizonte 3: Estratificación tamaño variable con dominio de grava fina, 2 intercalaciones delgadas de menos de 4 cm cuarzo fina que genera discontinuidad al paso del agua.

Calicata 2. Descripción del perfil de suelo en el sitio Matorral Carmen Alto.

| Profundidad (cm) | |
|-------------------------|--|
| 0-3 A ₁ | Negro (10 YR 2/1); franco arenosa; no adhesivo y moderadamente plástico; granular muy fino débil; raíces finas abundantes, medias pocas; poros finos abundantes; límite lineal abrupto. |
| 3-11 A ₂ | Pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4); franco arcillo arenosa; moderadamente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos y medios débiles; raíces finas y medias pocas; poros finos abundantes; límite lineal claro. |
| 11-27 A ₃ | Pardo amarillento (10YR 5/4); franco arcillosa; moderadamente adhesivo y moderadamente plástico; bloques subangulares medios y gruesos moderados; raíces finas y medias pocas; poros finos abundantes; rangos redox de manganeso finos difusos abundantes de color pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); límite ondulado claro. |
| 27-54 B _c | Gris parduzco claro (10YR 6/2); arcillo limosa; moderadamente adhesivo y muy plástico; bloques subangulares finos débiles; raíces finas muy pocas, medias y gruesas pocas; poros finos comunes, medios pocos; rangos redox finos difusos abundantes de color pardo amarillento (10 YR 5/6), concreciones pocas de color gris azulado muy oscuro (GLEY 2 3/5B) y nódulos de manganeso gruesos comunes; límite lineal claro. |
| 54-95 B _t | Pardo rojizo claro (2.5 YR 6/3); arcillo limosa; muy adhesivo y muy plástico; bloques subangulares medios débiles; raíces finas y medias muy pocas, gruesas pocas; poros finos comunes; cutanes abundantes; nódulos de manganeso finos, prominentes y comunes de color pardo amarillento (10YR 5/6); grava de cuarzo fina en un 5 %; límite lineal claro. |
| 95-130+ BC | Pardo rojizo claro (2.5YR 6/4); arcillosa; muy adhesivo y muy plástico; masivo; raíces finas y medias abundantes; poros finos pocos; nódulos de manganeso pocos de color pardo amarillento (10YR 5/6); grava de cuarzo desde fina a gruesa en un 10%. |

Observaciones:

Horizonte 1: mantillo orgánico altamente humificado. No se tomó muestra para análisis de laboratorio. Muy friable al momento de la descripción.

Horizonte 2 y 3: friables.

Horizonte 4: firme. Tiene una interfase de 3 cm de espesor con una ligera oxidación.

Horizonte 5: muy firme. Las raíces se localizan mayoritariamente en la base del horizonte.

Horizonte 6: sustrato de arcilla densa. En las grietas aparecen concentraciones de raíces descritas.

Calicata 3. Descripción del perfil de suelo en el sitio Matorral San Agustín.

| Profundidad (cm) | |
|--------------------------|---|
| 0-5 A ₁ | Pardo (10YR 4/3); franco arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos débiles; raíces muy finas, finas y medias abundantes; poros finos comunes, medios abundantes; límite lineal claro. |
| 5-12 A ₂ | Pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); franco arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos débiles, medios moderados; raíces muy finas y finas comunes, medias pocas; poros finos comunes, gruesos pocos; rangos redox finos pocos de color pardo fuerte (7.5YR 5/8); límite ondulado gradual. |
| 12-38 B ₁ | Pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); franco arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares medios débiles; raíces muy finas y finas pocas, medias y gruesas comunes; poros finos, medios y gruesos comunes; rangos redox finos comunes de color pardo fuerte (7.5YR 5/8); límite ondulado gradual. |
| 38-90 B ₂ | Pardo amarillento (10YR 5/4); franco arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares medios y gruesos moderados; raíces muy finas y finas pocas, medias y gruesas comunes; poros finos, medios y gruesos comunes; rangos redox finos comunes de color pardo fuerte (7.5YR 5/8) y nódulos de manganeso recubiertos de óxidos de hierro en un 5%; límite ondulado gradual. |
| 90-110 B ₃ | Pardo (10YR5/3); areno francosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares medios y gruesos débiles; raíces muy finas, finas y medias pocas; poros finos comunes, medios abundantes; rangos redox finos comunes de color pardo fuerte (7.5YR 5/8) y nódulos de manganeso recubiertos de óxidos de hierro pocos; grava fina de 2 a 4 mm en un 10%; límite ondulado gradual. |
| 110-145+ BC | Pardo amarillento (10YR 5/4); areno francosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos débiles; raíces finas pocas; poros finos y medios comunes; rangos redox finos comunes de color pardo fuerte (7.5YR 5/8) y nódulos de manganeso pocos; grava fina de 3 a 5 mm en un 10%. |

Observaciones:

Calicata 4. Descripción del perfil de suelo en el sitio Pino La Granja.

| Profundidad (cm) | |
|---------------------------|--|
| 0 -19 A | Pardo amarillento oscuro (10YR 3/6); franco arenosa; no adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos y medios moderados; raíces finas y medias pocas; poros finos abundantes, medios comunes; grava de cuarzo subangular fina en un 10%; límite lineal claro. |
| 19-37 B _{w1} | Pardo oscuro (7.5YR 3/4); franco arenosa grueso; no adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares muy finos, finos y medios moderados; raíces finas, medias y gruesas comunes; poros finos y medios abundantes; límite lineal claro. |
| 37-55 B _{w2} | Pardo (7.5YR 4/4) en un 60 % y pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) en un 40% de la matriz; franco arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares medios débiles; raíces finas pocas; poros finos abundantes; límite lineal claro. |
| 55-85 BC | Variiegado con dominio del pardo amarillento oscuro (10YR 4/4); franco arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; grano simple; raíces finas y medias pocas; poros finos abundantes; masas de manganeso finas, medias y concreciones finas abundantes; grava de cuarzo fina en un 60%; límite lineal gradual. |
| 85-110+ C _m | Material consolidado; blanco (5Y 8/1); areno francosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; masivo; raíces finas y medias muy pocas; poros finos pocos; masas de manganeso medias y gruesas abundantes. Posible cementación por sílice. |

Observaciones:

Horizonte 2: Hifas de hongos comunes.

Horizonte 4: es de transición con grava meteorizada.

Horizonte 5: extremadamente firme, aunque en ciertos sectores se puede excavar con la pala, en otros sectores presenta cementaciones.

Calicata 5. Descripción del perfil de suelo en el sitio Pino San Pedro.

| Profundidad (cm) | |
|--------------------------|--|
| 0 -20 A | Pardo oscuro (7.5 YR 3/4); franco arcillosa; moderadamente adhesivo y moderadamente plástico; bloques subangulares medios moderados; raíces finas y medias abundantes, gruesas comunes; poros finos abundantes, medios y gruesos comunes; grava fina en un 5%; límite lineal abrupto. |
| 20-35 B | Pardo rojizo oscuro (5YR 3/4); franco arcillosa; moderadamente adhesivo y moderadamente plástico; bloques subangulares finos y medios moderados a fuertes; raíces finas comunes, medias pocas; poros finos abundantes, medios comunes, gruesos pocos; cutanes pocos; masas de manganeso finas y medias abundantes; grava fina en un 5%; límite lineal claro. |
| 35-67 Bt ₁ | Pardo rojizo oscuro (5YR 3/4); arcillosa; muy adhesivo y muy plástico; bloques subangulares medios moderados a débiles; raíces finas comunes, medias pocas; poros finos comunes, medios pocos; cutanes abundantes; masas de manganeso finas abundantes; límite lineal difuso. |
| 67-95 Bt ₂ | Pardo rojizo oscuro (5YR 3/4); arcillosa; muy adhesivo y muy plástico; bloques subangulares finos y medios de moderados a débiles; raíces finas pocas; poros finos y medios comunes; cutanes abundantes; masas de manganeso medias comunes; límite ondulado difuso. |
| 95-140+ BC | Pardo (7.5 YR 4/4); franco arcillosa; muy adhesivo y muy plástico; bloques subangulares medios y gruesos débiles; raíces finas y medias pocas; poros finos abundantes, medios comunes; masas de manganeso recubiertas con óxidos de hierro medias comunes y nódulos de manganeso finos pocos; grava fina en un 5%. |

Observaciones:**Horizonte 1:** presencia de hifas de hongos.**Horizonte 2:** presencia de hifas de hongos.**Horizonte 3:** presencia de hifas de hongos en menor abundancia que el horizonte 2.

Calicata 6. Descripción del perfil de suelo en el sitio Pino San Agustín.

| Profundidad (cm) | |
|----------------------------|---|
| 0 -9 A ₁ | Pardo oscuro (7.5YR 3/4) en un 70% y pardo amarillento (10YR 5/4) en un 30% de la matriz; franca; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares medios moderados; raíces finas y medias abundantes; poros finos y medios abundantes; límite lineal abrupto. |
| 9-32 A ₂ | Pardo oscuro (7.5YR 3/4); franco arcillo arenosa; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; bloques subangulares finos y medios fuertes; raíces finas, medias y gruesas abundantes; poros finos abundantes, medios comunes y gruesos pocos; grava fina angular en un 5%; límite lineal claro. |
| 32-59 B _{w1} | Pardo (7.5YR 5/4); franco arcillo arenosa; muy adhesivo y moderadamente plástico; bloques subangulares medios y gruesos fuertes; raíces muy finas abundantes, medias comunes y muy gruesas pocas; poros finos abundantes, medios comunes; rangos redox distintos difusos comunes de color pardo oscuro (7.5YR 4/6), rangos redox de hierro pocos y concreciones de manganeso pocas; límite ondulado claro. |
| 59-91 BC ₁ | Pardo claro (7.5YR 6/3) en un 80% de la matriz; franco arcillo arenosa; moderadamente adhesivo y moderadamente plástico; bloques subangulares medios y gruesos fuertes; raíces finas, medias y gruesas comunes; poros finos abundantes, medios pocos; masas de hierro difusos comunes de color rojo amarillento (5YR 5/6) y concreciones de manganeso finas abundantes de color negro (N 2/0); límite ondulado abrupto. |
| 91-160+ BC ₂ | Gris parduzco claro (10YR 6/2) en un 70% de la matriz; franco arcillosa; moderadamente adhesivo y moderadamente plástico; bloques subangulares finos débiles; raíces finas muy pocas; poros finos abundantes; masas de hierro difusos comunes de color rojo amarillento (5YR 5/6), concreciones de manganeso finas comunes de color negro (N 2/0) formando una línea en el horizonte; grava fina en un 5%. |

Observaciones:

Horizonte 1: Presencia de hongos saprofitos y madera en descomposición abundante.

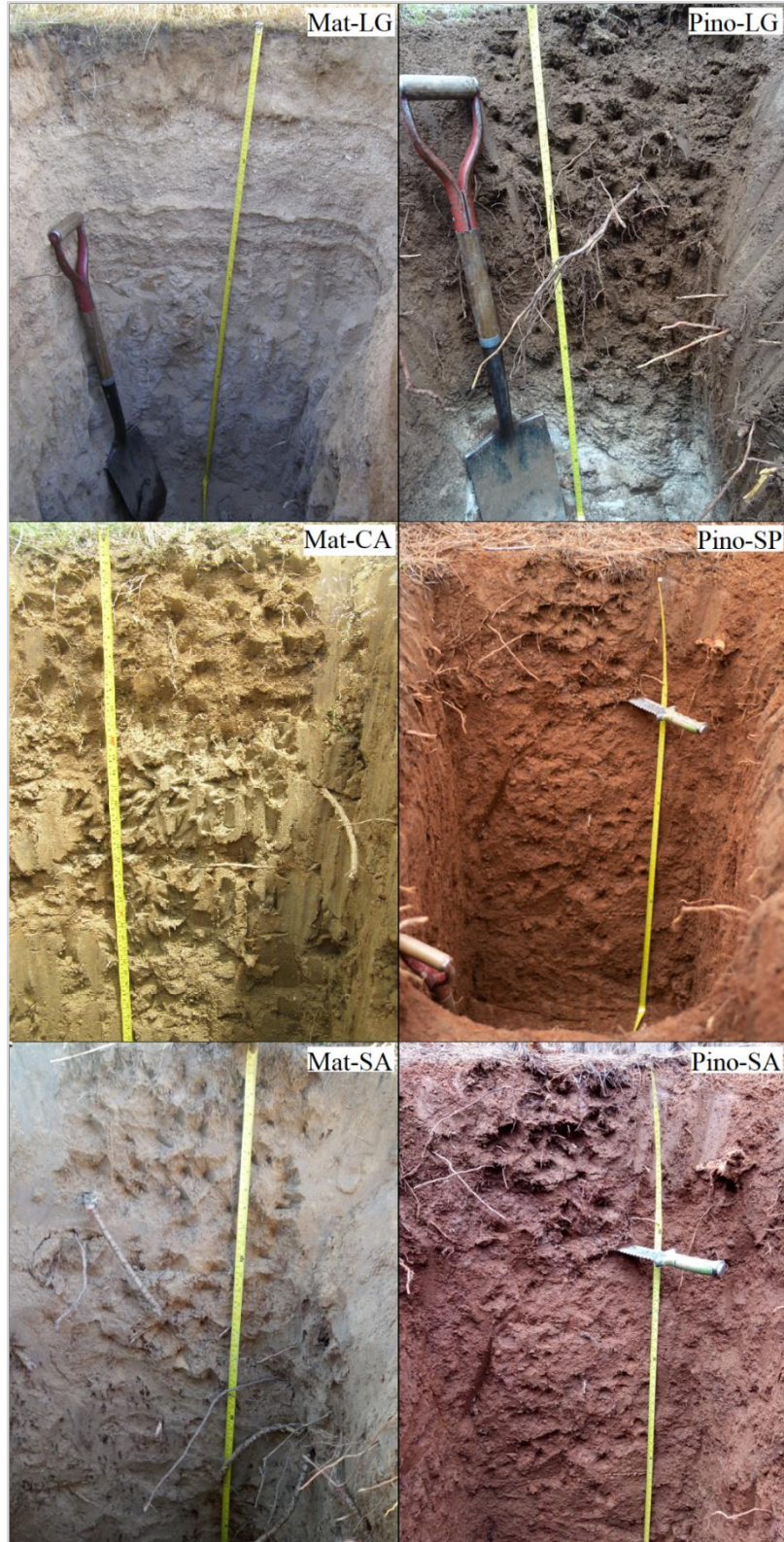
Horizonte 2: Presencia de madera en descomposición.

Horizonte 3: Presencia Hifas de hongos.

Horizonte 4: Presencia Hifas de hongos en menor cantidad que el horizonte 3.

Horizonte 5: Probable cementación con sílice.

Apéndice 1.2. Fotografías de los perfiles descritos: Matorral La Granja, Pino La Granja, Matorral Carmen Alto, Pino San Pedro, Matorral San Agustín y Pino San Agustín.

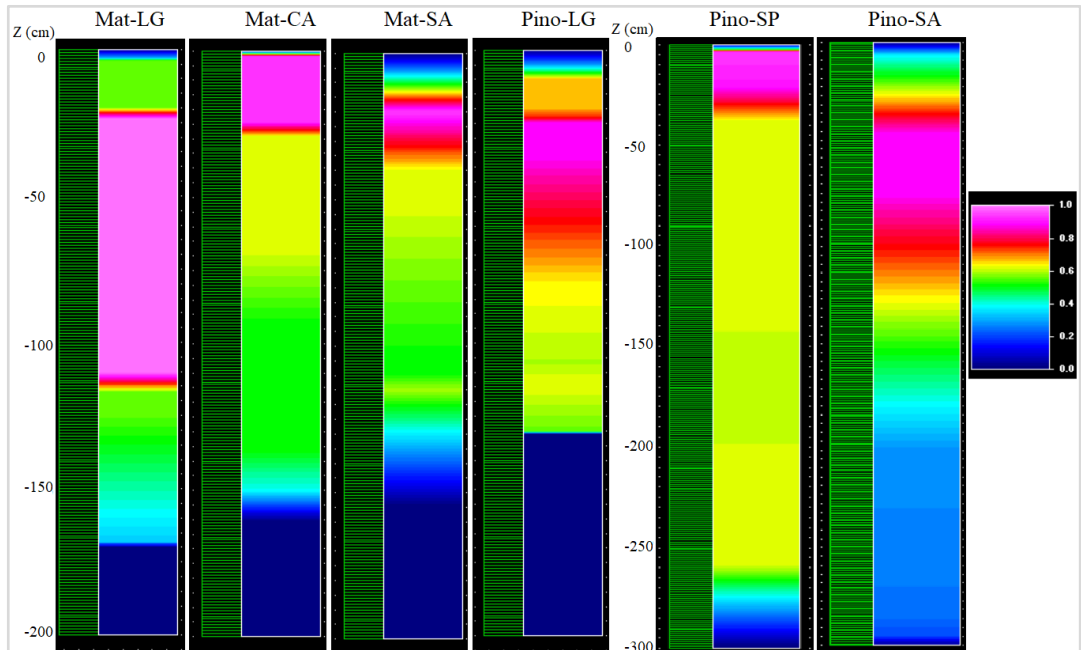


Apéndice 2. Parámetros físicos medidos en laboratorio para cada horizonte en cada sitio.

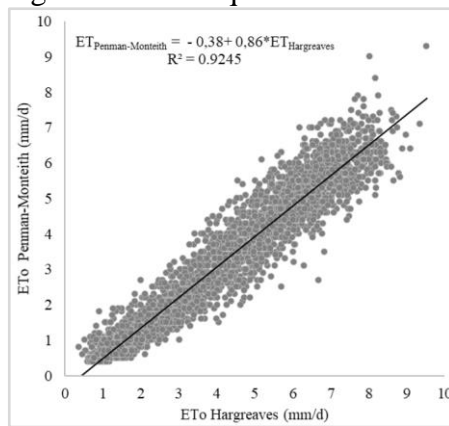
| Sitio | Horizonte cm | A % | L % | a % | Da Mg m ⁻³ | Dr | CC cm ³ cm ⁻³ | PMP |
|----------------|-----------------|--------|--------|--------|--------------------------|------|--|-------|
| Matorral LG | 0-9 | 15,5 | 28,2 | 56,3 | 1,08 | 2,46 | 0,224 | 0,113 |
| | 9-19 | 5,2 | 2,6 | 92,2 | 1,50 | 2,55 | 0,085 | 0,054 |
| | 19-60 | 7,2 | 3,6 | 89,1 | 1,54 | 2,61 | 0,069 | 0,043 |
| | 60-85 | 20,5 | 23,0 | 56,5 | 1,57 | 2,52 | 0,236 | 0,131 |
| | 85-124 | 17,4 | 16,8 | 65,8 | 1,64 | 2,45 | 0,172 | 0,098 |
| | 124-170 | 20,0 | 13,2 | 66,8 | 1,74 | 2,70 | 0,150 | 0,098 |
| Matorral CA | 3-11 | 16,6 | 20,3 | 63,1 | 1,49 | 2,57 | 0,262 | 0,132 |
| | 11-27 | 26,9 | 19,3 | 53,8 | 1,51 | 2,64 | 0,257 | 0,137 |
| | 27-54 | 48,6 | 10,5 | 40,9 | 1,69 | 2,69 | 0,353 | 0,312 |
| | 54-95 | 59,5 | 12,7 | 27,9 | 1,73 | 2,64 | 0,360 | 0,323 |
| | 95-130 | 61,7 | 12,7 | 25,7 | 1,73 | 2,44 | 0,364 | 0,296 |
| Matorral SA | 0-5 | 6,6 | 14,5 | 78,9 | 1,29 | 2,54 | 0,141 | 0,099 |
| | 5-12 | 6,6 | 14,1 | 79,3 | 1,43 | 2,58 | 0,116 | 0,062 |
| | 12-38 | 3,8 | 11,1 | 85,1 | 1,56 | 2,58 | 0,101 | 0,051 |
| | 38-90 | 7,6 | 14,0 | 78,4 | 1,60 | 2,60 | 0,099 | 0,047 |
| | 90-110 | 4,8 | 10,1 | 85,1 | 1,64 | 2,63 | 0,093 | 0,040 |
| | 110-145 | 7,6 | 11,0 | 81,3 | 1,61 | 2,63 | 0,089 | 0,034 |
| Pino LG | 0-19 | 12,1 | 11,7 | 76,1 | 1,47 | 2,64 | 0,121 | 0,063 |
| | 19-37 | 12,1 | 11,7 | 76,2 | 1,63 | 2,58 | 0,126 | 0,073 |
| | 37-55 | 15,2 | 9,7 | 75,1 | 1,55 | 2,66 | 0,132 | 0,088 |
| | 55-85 | 17,2 | 6,7 | 76,1 | 1,60 | 2,63 | 0,127 | 0,086 |
| | 85-110 | 10,1 | 7,7 | 82,3 | 1,72 | 2,57 | 0,080 | 0,048 |
| | 110-135 | 13,7 | 10,1 | 76,3 | - | - | - | - |
| 135-200 | 35,1 | 12,7 | 52,2 | - | - | - | - | |
| Pino SP | 0-20 | 19,0 | 16,2 | 64,8 | 1,60 | 2,57 | 0,206 | 0,116 |
| | 20-35 | 37,6 | 12,3 | 50,2 | 1,47 | 2,59 | 0,285 | 0,208 |
| | 35-67 | 46,1 | 10,3 | 43,7 | 1,64 | 2,60 | 0,317 | 0,243 |
| | 67-95 | 43,9 | 12,3 | 43,7 | 1,61 | 2,62 | 0,313 | 0,228 |
| | 95-140 | 27,0 | 14,1 | 58,9 | 1,72 | 2,49 | 0,275 | 0,204 |
| Pino SA | 0-9 | 13,9 | 12,7 | 73,4 | 0,54 | 2,39 | 0,281 | 0,096 |
| | 9-32 | 17,8 | 12,5 | 69,7 | 1,33 | 2,50 | 0,182 | 0,102 |
| | 32-59 | 20,8 | 9,5 | 69,8 | 1,65 | 2,62 | 0,188 | 0,125 |
| | 59-91 | 15,0 | 10,1 | 74,9 | 1,74 | 2,61 | 0,190 | 0,122 |
| | 91-160 | 17,7 | 11,1 | 71,2 | 1,71 | 2,57 | 0,175 | 0,090 |
| | 160-190 | 11,7 | 13,5 | 74,8 | - | - | - | - |
| 190-200 | 18,4 | 13,2 | 68,4 | - | - | - | - | |

A: arcilla, L: limo, a: arena, Dr: densidad real; Da: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente.

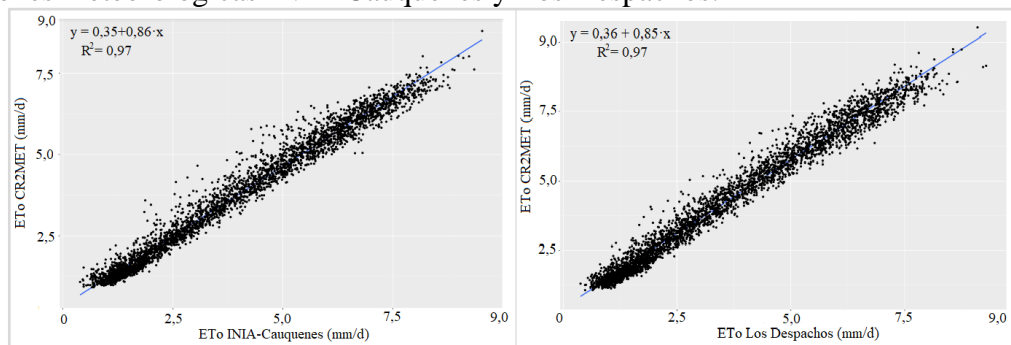
Apéndice 3. Esquema del factor de abundancia de raíces ingresado a HYDRUS en cada sitio de estudio.



Apéndice 4. Relación entre la ETo Hargreaves y ETo Penman-Monteith reconstruida con los datos de la estación meteorológica INIA-Cauquenes entre los años 2010 y 2019.

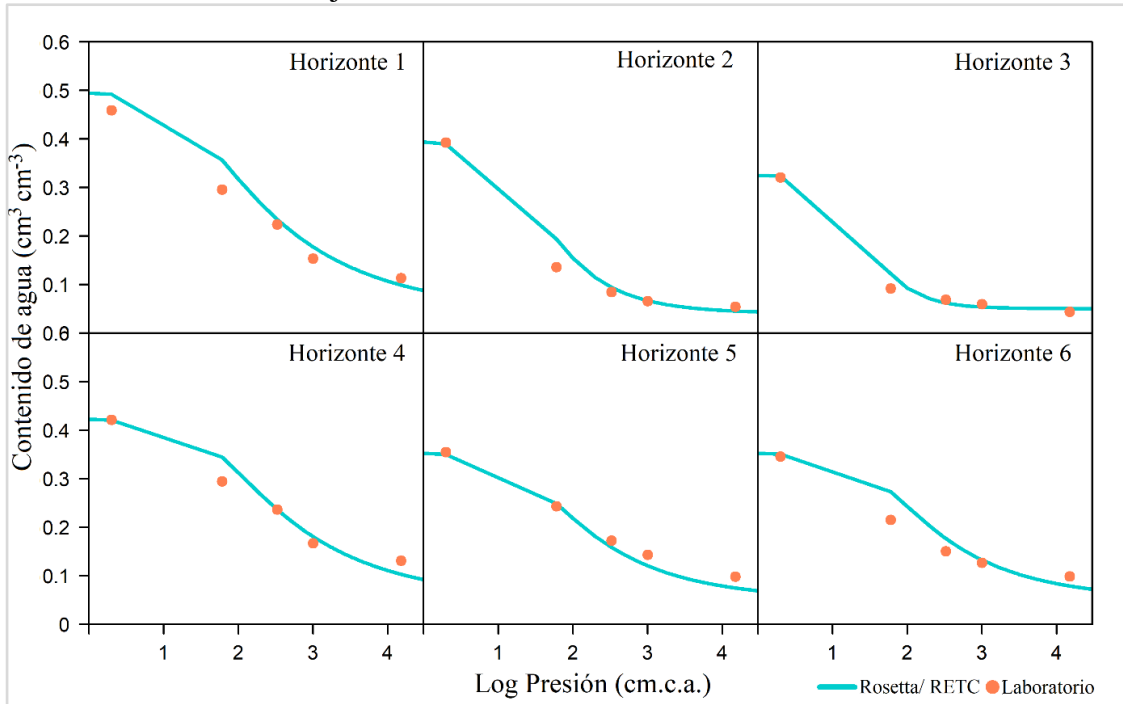


Apéndice 5. Validación de la ETo Hargreaves calculada con el producto CR2MET y con las estaciones meteorológicas INIA-Cauquenes y Los Despachos.

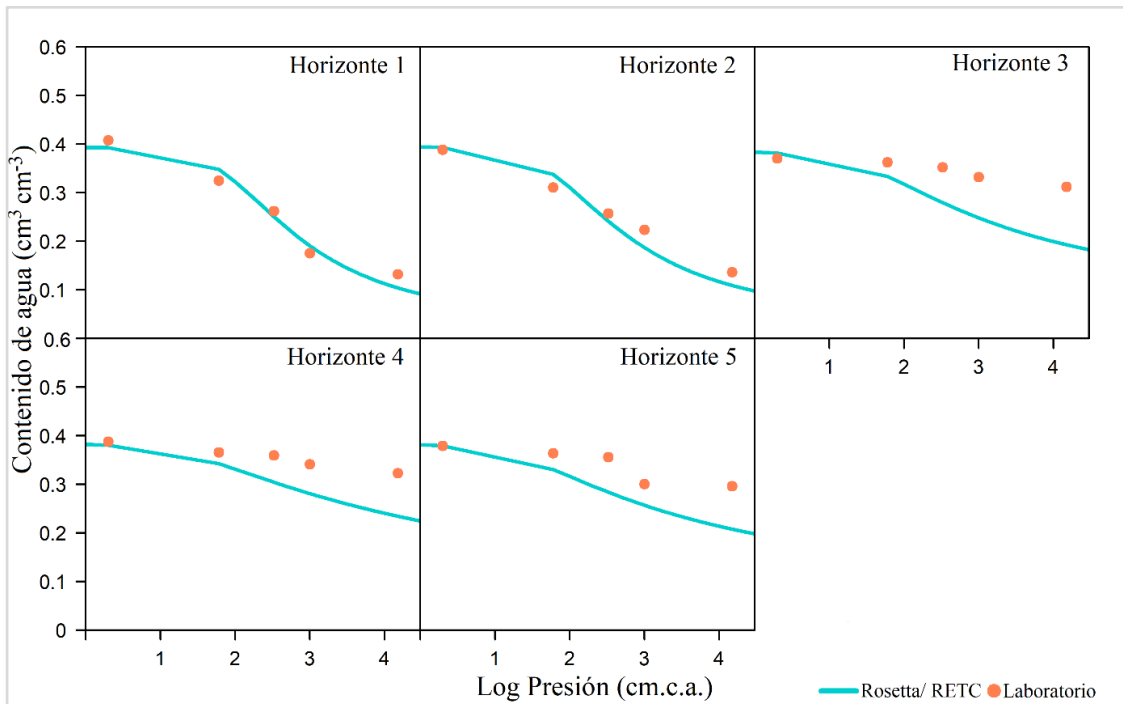


Apéndice 6. Curvas de retención de agua y mediciones de laboratorio de todos los horizontes de cada sitio.

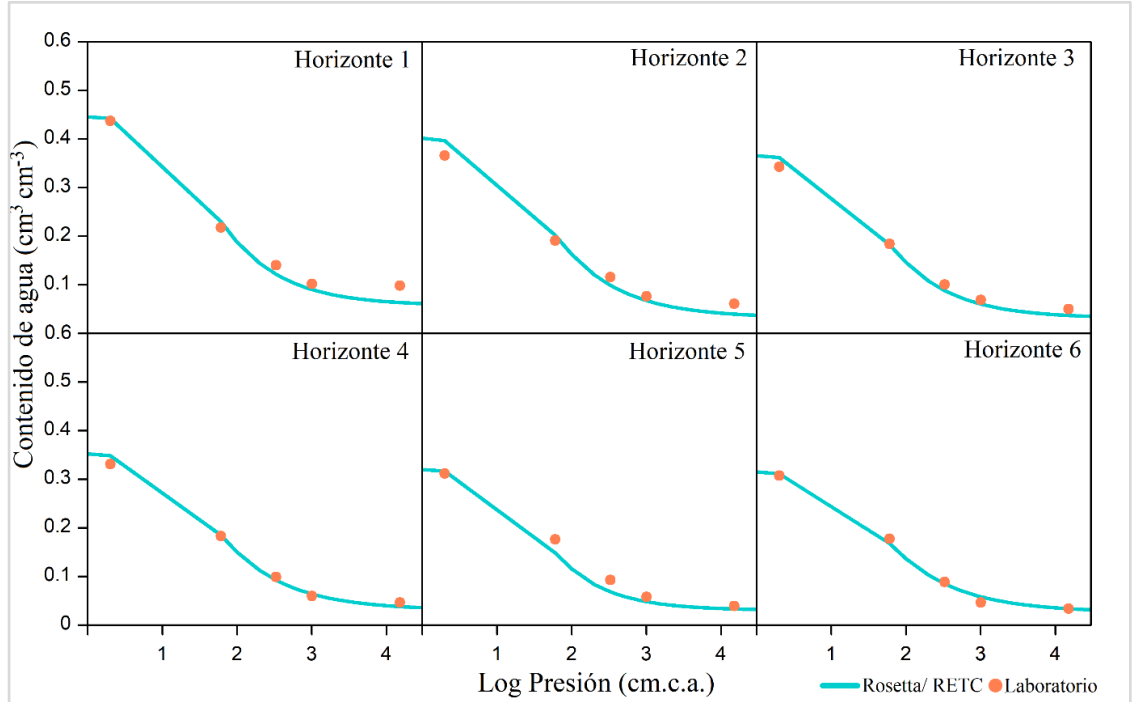
Sitio 1. Matorral La Granja.



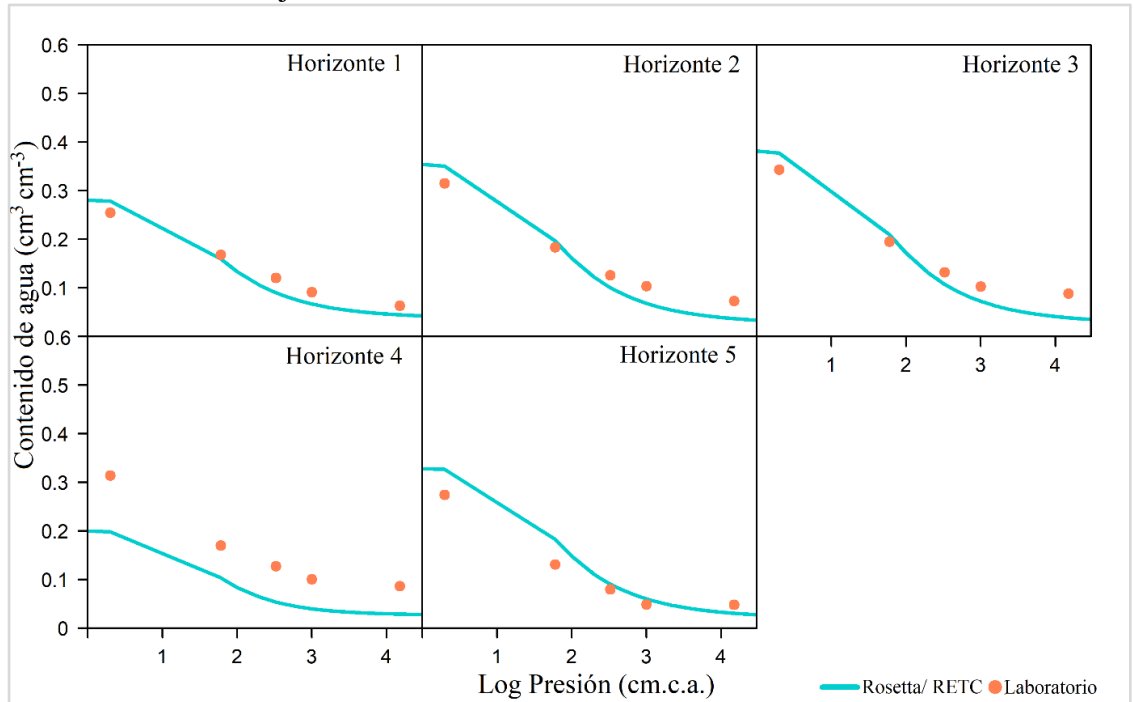
Sitio 2. Matorral Carmen Alto.



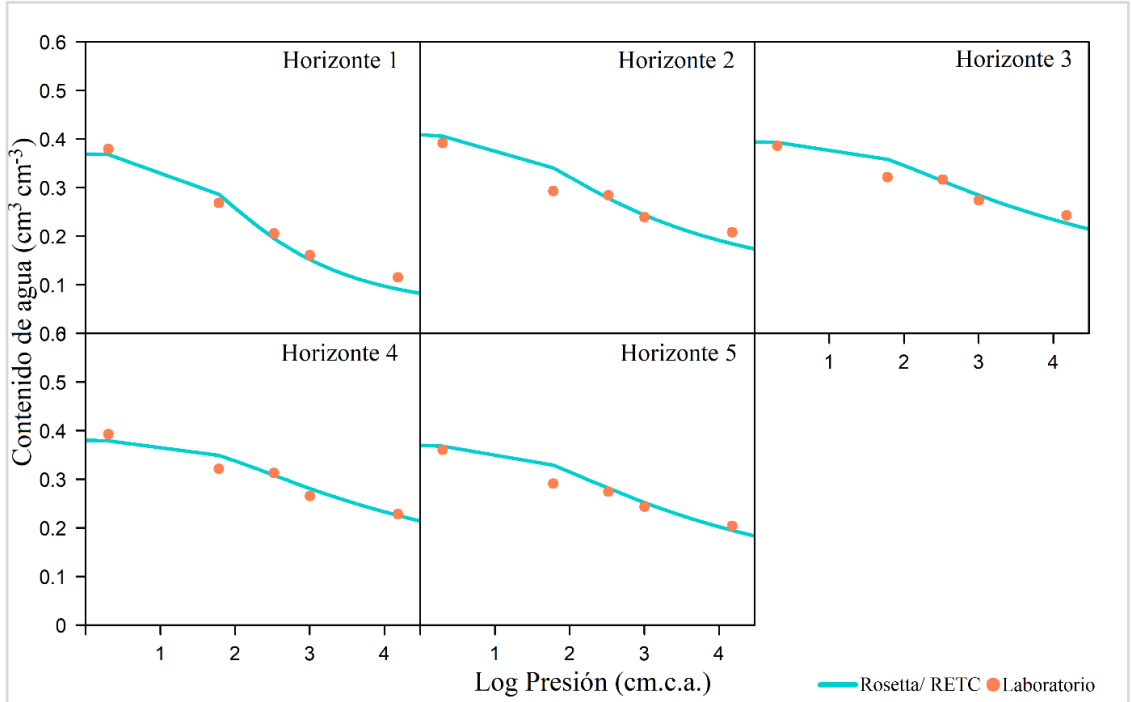
Sitio 3. Matorral San Agustín.



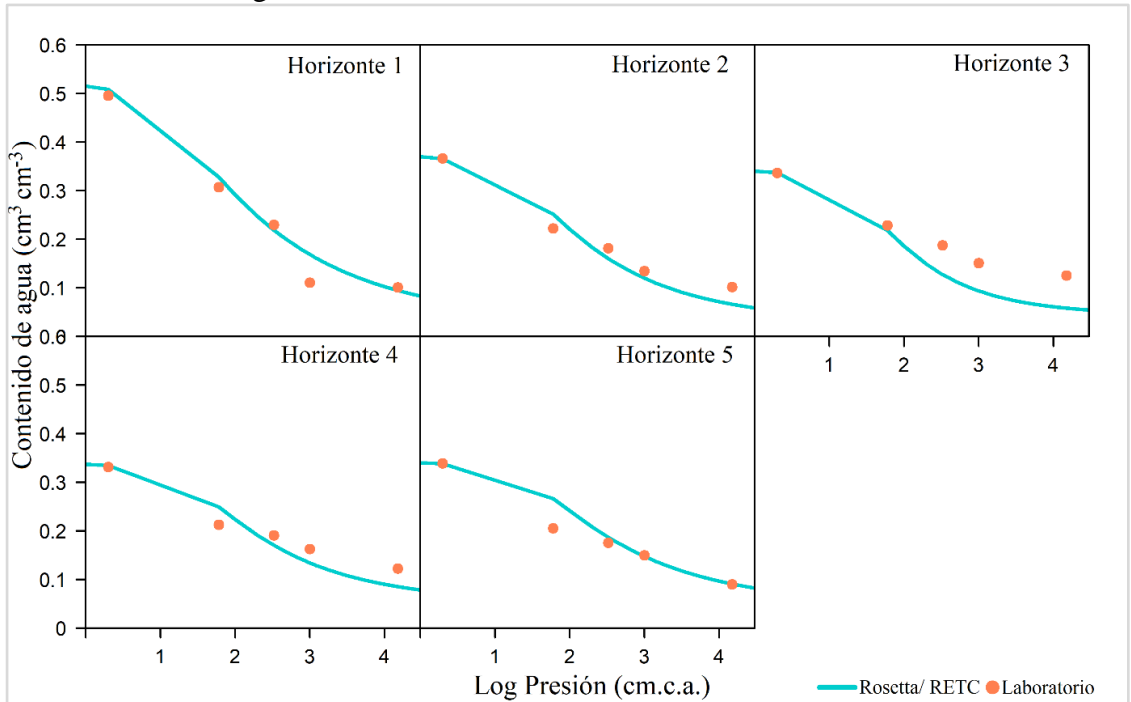
Sitio 4. Pino La Granja.



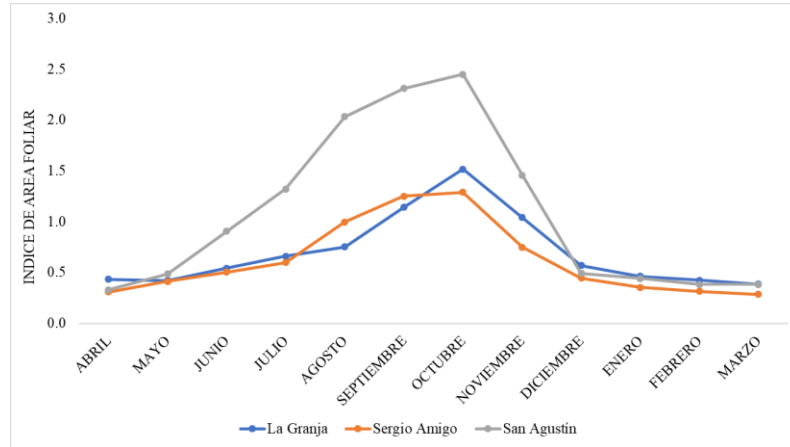
Sitio 5. Pino San Pedro.



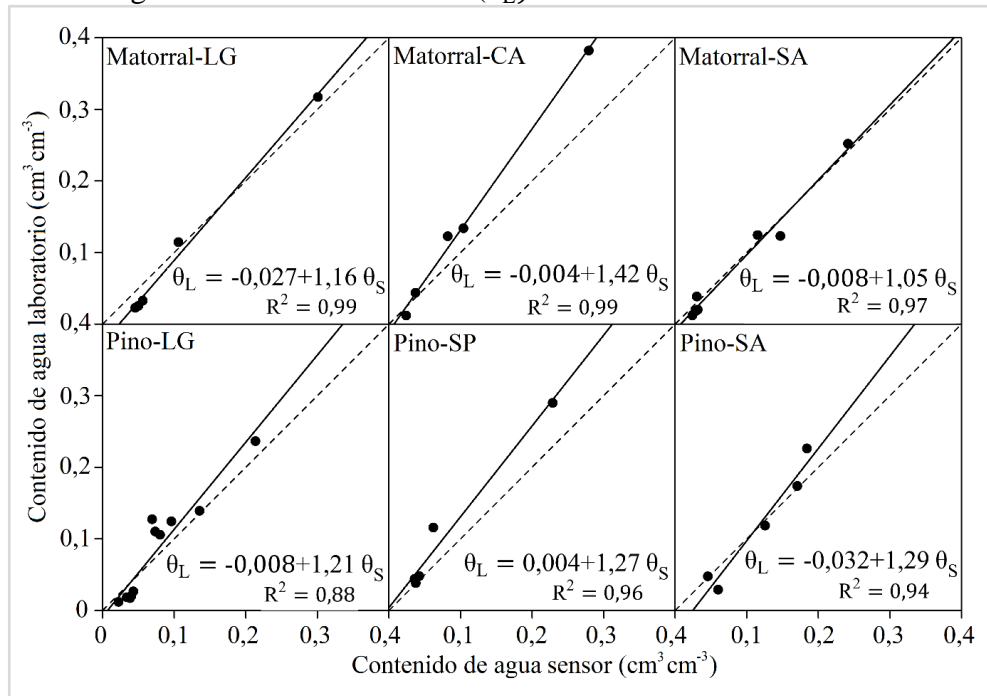
Sitio 6. Pino San Agustín.



Apéndice 7. Dinámica del Índice de Área Foliar (IAF) de las praderas a lo largo de un año hidrológico.



Apéndice 8. Curvas de calibración del contenido de agua medido por los sensores (θ_S) versus el contenido de agua medido en laboratorio (θ_L) en cada sitio de estudio.



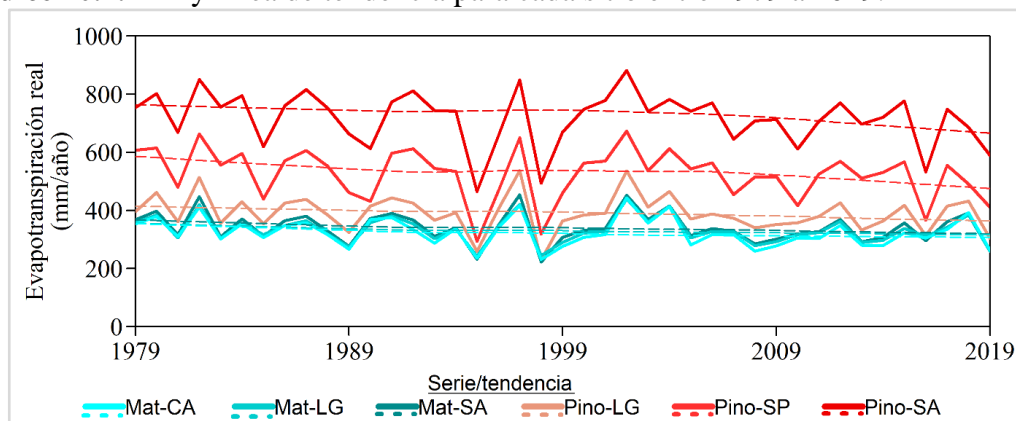
Apéndice 9.1. Métricas estadísticas entre lo observado por los sensores y lo simulado por el modelo a las distintas profundidades del sitio matorral Carmen Alto.

| Métricas | Verificación | | | | | | | | |
|----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 13 cm | 33 cm | 53 cm | 63 cm | 83 cm | 93 cm | 113 cm | 123 cm | 143 cm |
| R ² | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,95 | 0,97 | 0,61 | 0,65 | 0,64 |
| NSE | 0,01 | 0,85 | 0,97 | 0,95 | 0,75 | 0,92 | 0,45 | 0,63 | 0,63 |
| KGE | 0,49 | 0,94 | 0,93 | 0,86 | 0,70 | 0,95 | 0,77 | 0,80 | 0,65 |
| PBIAS % | 36,00 | 5,90 | 0,90 | -1,60 | 3,20 | 2,30 | -3,50 | -0,80 | 0,80 |
| RMSE | 0,08 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| RRMSE % | 40,43 | 7,01 | 3,62 | 3,63 | 5,27 | 3,15 | 9,20 | 8,14 | 8,04 |

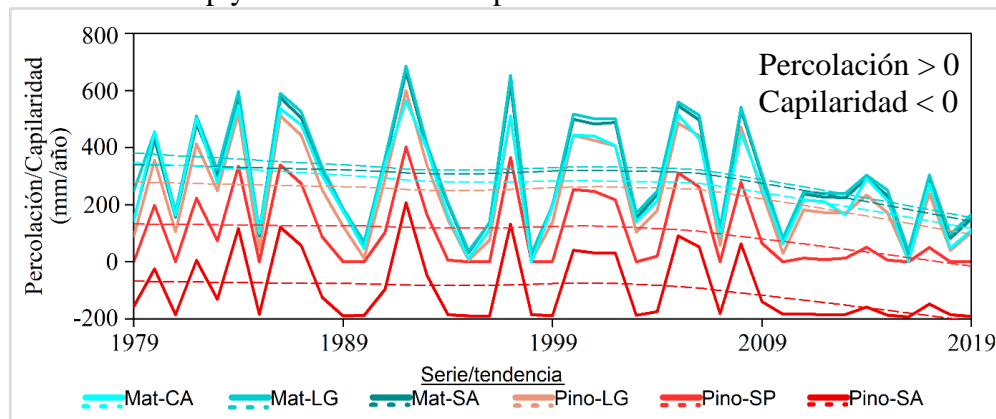
Apéndice 9.2. Métricas estadísticas entre lo observado por los sensores y lo simulado por el modelo a las distintas profundidades del sitio pino San Pedro.

| Calibración | | | | | | | | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Métrica | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 70 cm | 80 cm | 100 cm | 110 cm | 130 cm | 140 cm | 150 cm |
| R ² | 0,88 | 0,87 | 0,75 | 0,77 | 0,84 | 0,86 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,96 |
| NSE | 0,81 | -1,35 | 0,49 | 0,05 | -0,73 | -0,78 | 0,76 | 0,91 | 0,76 | 0,93 |
| KGE | 0,88 | 0,41 | 0,60 | 0,26 | -0,04 | 0,35 | 0,67 | 0,96 | 0,95 | 0,92 |
| PBIAS % | -9,80 | 29,00 | 0,30 | -0,70 | 4,00 | -6,70 | -1,10 | 1,30 | -3,40 | 1,40 |
| RMSE | 0,03 | 0,06 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| RRMSE % | 16,44 | 32,28 | 10,11 | 10,24 | 9,33 | 8,43 | 3,31 | 2,48 | 3,88 | 2,42 |
| Verificación | | | | | | | | | | |
| Métrica | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 70 cm | 80 cm | 100 cm | 110 cm | 130 cm | 140 cm | 150 cm |
| R ² | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,97 | 0,95 | 0,92 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| NSE | 0,86 | 0,59 | 0,85 | 0,85 | 0,82 | 0,73 | 0,94 | 0,83 | 0,96 | 0,88 |
| KGE | 0,76 | 0,77 | 0,73 | 0,81 | 0,88 | 0,85 | 0,95 | 0,93 | 0,92 | 0,82 |
| PBIAS % | -18,2 | 22,60 | 8,60 | 8,10 | 5,10 | -4,50 | 1,30 | 4,90 | -1,00 | 4,70 |
| RMSE | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| RRMSE % | 20,61 | 23,00 | 12,39 | 9,96 | 6,38 | 5,87 | 2,85 | 5,56 | 3,05 | 6,26 |

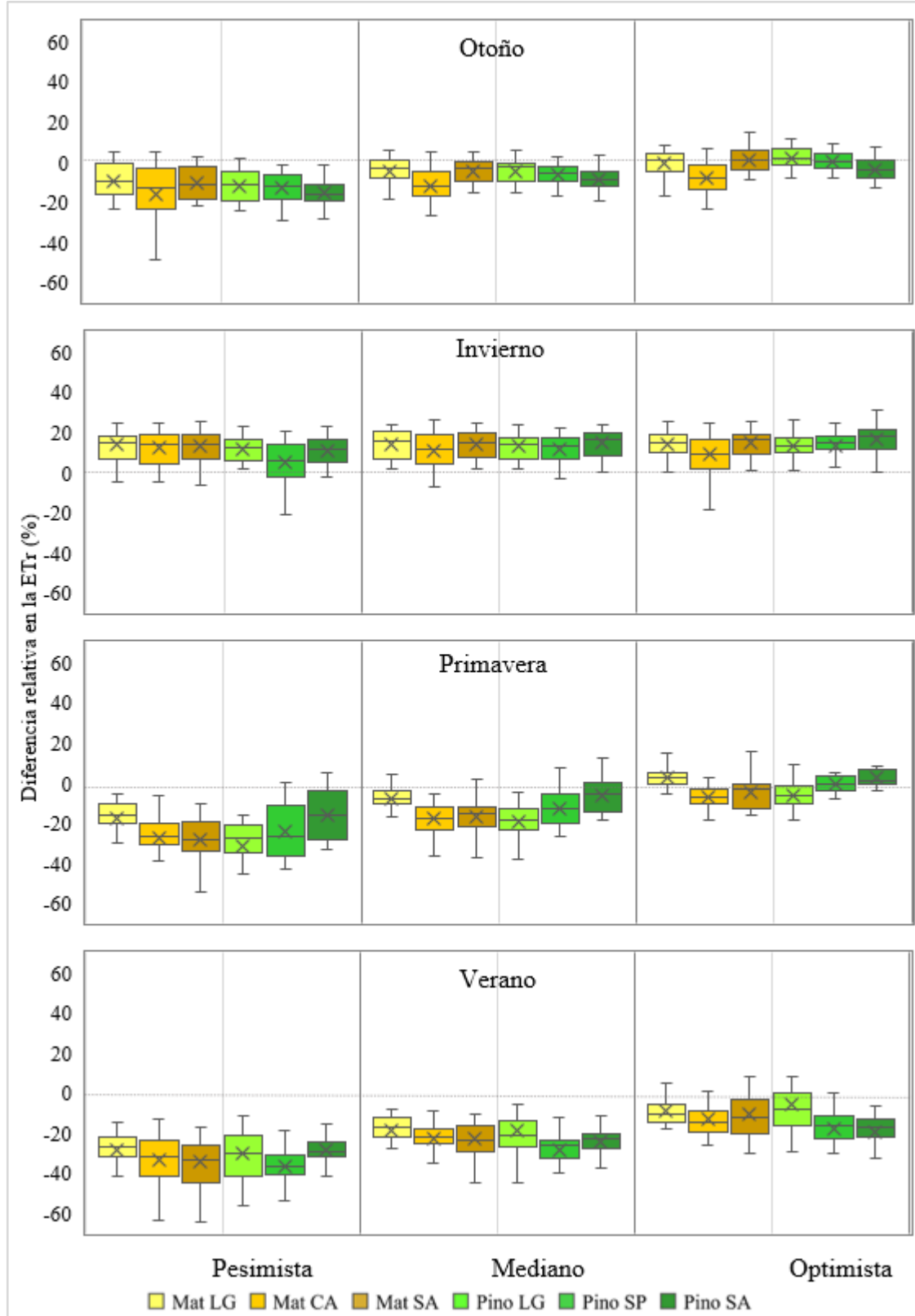
Apéndice 10.1. ETr y línea de tendencia para cada sitio entre 1979 a 2019.



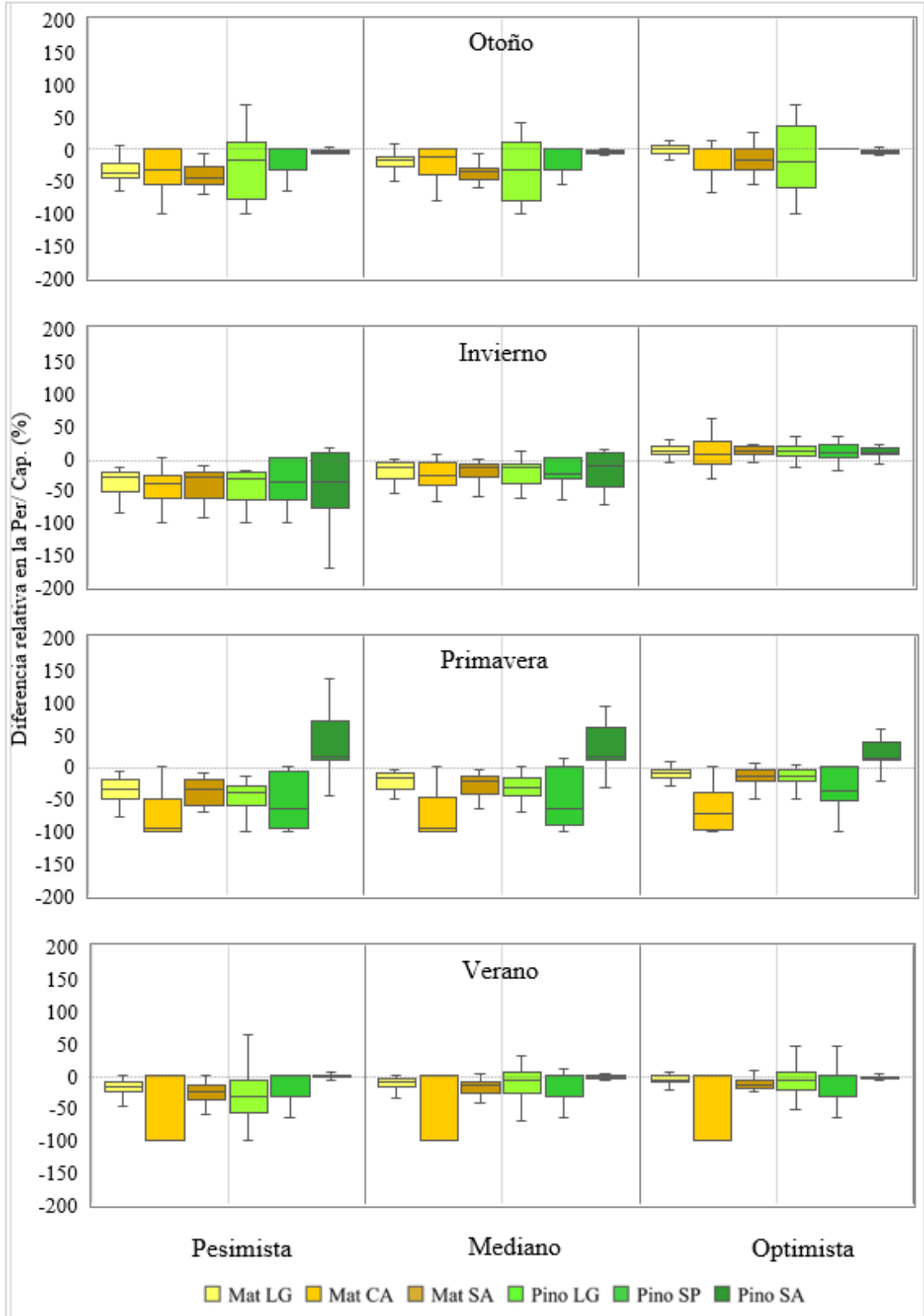
Apéndice 10.2. Per/cap y línea de tendencia para cada sitio desde 1979 a 2019.



Apéndice 11.1. Diferencias relativas estacionales en la evapotranspiración real (ETr) entre el periodo de referencia (1979-2005) y los escenarios futuros (2020-2046) para cada sitio.



Apéndice 11.2. Diferencias relativas estacionales en la percolación/capilaridad (Per/cap) entre el periodo de referencia (1979-2005) y los escenarios futuros (2020-2046) para cada sitio.



Apéndice 12.1. Cambio en la evapotranspiración real al tener plantaciones de pino¹ en vez de matorrales².

| | Cambio en la evapotranspiración real | | | | | | | | | |
|----------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|-------|-------|---|-----------------------------|--------------------------------------|------|------|
| | millones de m ³ año ⁻¹ | | | | | equivalente a millones de camiones aljibe año ⁻¹ | | | | |
| | Ref. (1979 al 2005) | Ms. (2010 al 2019) | Escenarios futuros (2020 al 2046) | | | Ref. (1979 al 2005) | Ms. (2010 al 2019) | Escenarios futuros (2020 al 2046) | | |
| | | Pes. | Med. | Opt. | | | Pes. | Med. | Opt. | |
| Min | 12,35 | 7,73 | 5,40 | 6,17 | 10,1 | 1,23 | 0,77 | 0,54 | 0,61 | 1,01 |
| Q ₁ | 15,55 | 11,43 | 9,66 | 12,66 | 15,27 | 1,55 | 1,14 | 0,96 | 1,26 | 1,52 |
| Me | 17,98 | 17,26 | 15,70 | 18,18 | 19,05 | 1,79 | 1,72 | 1,57 | 1,81 | 1,90 |
| Q ₃ | 19,39 | 17,99 | 18,93 | 19,49 | 20,11 | 1,93 | 1,79 | 1,89 | 1,94 | 2,01 |
| Max | 20,53 | 19,22 | 19,59 | 20,13 | 21,43 | 2,05 | 1,92 | 1,95 | 2,01 | 2,14 |
| Rango | 8,18 | 11,49 | 14,19 | 13,96 | 13,01 | 0,82 | 1,15 | 1,41 | 1,40 | 1,30 |

¹Plantaciones de *Pinus radiata* de 7 a 14 años y de densidad de 900, 1200 y 1350 individuos ha⁻¹

²Matorrales de *Acacia caven* de al menos 20 años, con densidad de 130, 270, 310 individuos ha⁻¹ y de cobertura de 24, 49 y 60%

Apéndice 12.2. Cambio en la percolación al tener plantaciones de pino¹ en vez de matorrales².

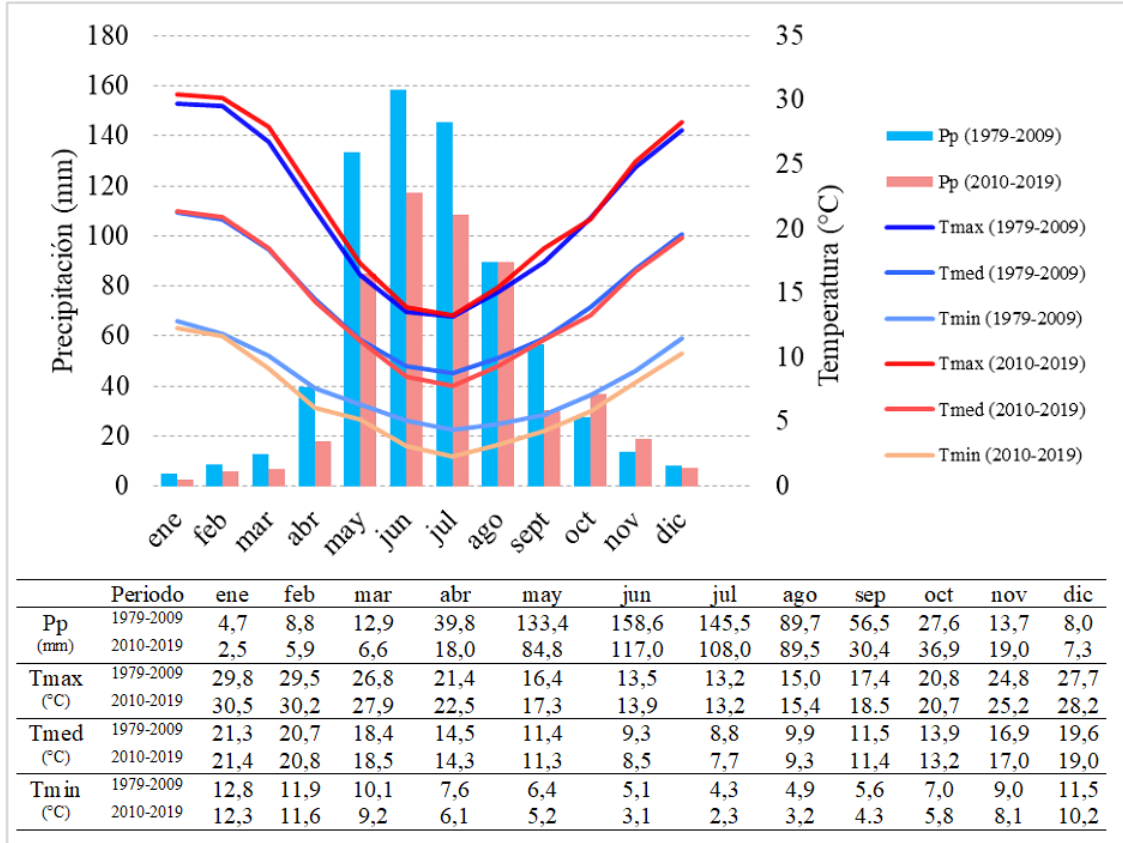
| | Cambio en la percolación | | | | | | | | | |
|----------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|--------|--------|---|-----------------------------|--------------------------------------|-------|-------|
| | millones de m ³ año ⁻¹ | | | | | equivalente a millones de camiones aljibe año ⁻¹ | | | | |
| | Ref. (1979 al 2005) | Ms. (2010 al 2019) | Escenarios futuros (2020 al 2046) | | | Ref. (1979 al 2005) | Ms. (2010 al 2019) | Escenarios futuros (2020 al 2046) | | |
| | | Pes. | Med. | Opt. | | | Pes. | Med. | Opt. | |
| Min | -8,89 | -6,51 | -5,68 | -5,71 | -9,16 | -0,89 | -0,65 | -0,57 | -0,57 | -0,92 |
| Q ₁ | -14,85 | -9,59 | -8,80 | -11,36 | -14,30 | -1,49 | -0,96 | -0,88 | -1,14 | -1,43 |
| Me | -18,40 | -16,92 | -14,78 | -17,23 | -17,65 | -1,84 | -1,69 | -1,48 | -1,72 | -1,77 |
| Q ₃ | -19,22 | -18,42 | -18,25 | -18,63 | -18,45 | -1,92 | -1,84 | -1,83 | -1,86 | -1,85 |
| Max | -22,17 | -19,69 | -20,02 | -19,88 | -20,77 | -2,22 | -1,97 | -2,00 | -1,99 | -2,08 |
| Rango | 13,28 | 13,18 | 14,34 | 14,17 | 11,61 | 1,33 | 1,32 | 1,43 | 1,42 | 1,16 |

¹Plantaciones de *Pinus radiata* de 7 a 14 años y de densidad de 900, 1200 y 1350 individuos ha⁻¹

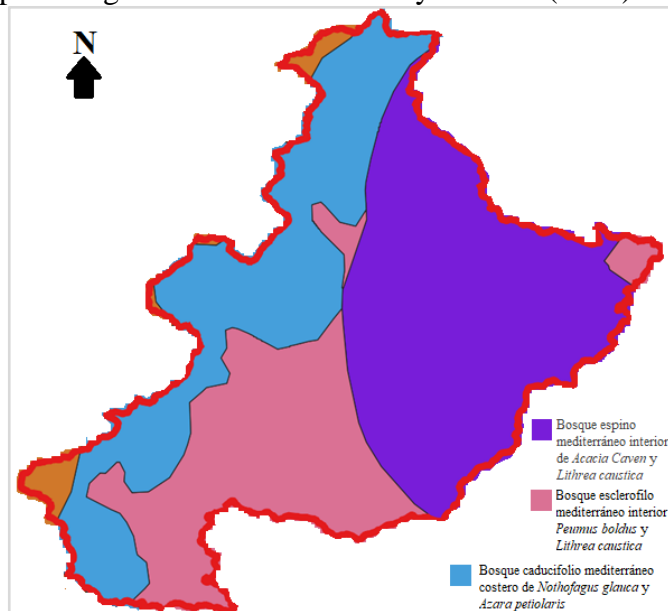
²Matorrales de *Acacia caven* de al menos 20 años, con densidad de 130, 270, 310 individuos ha⁻¹ y de cobertura de 24, 49 y 60%

ANEXOS

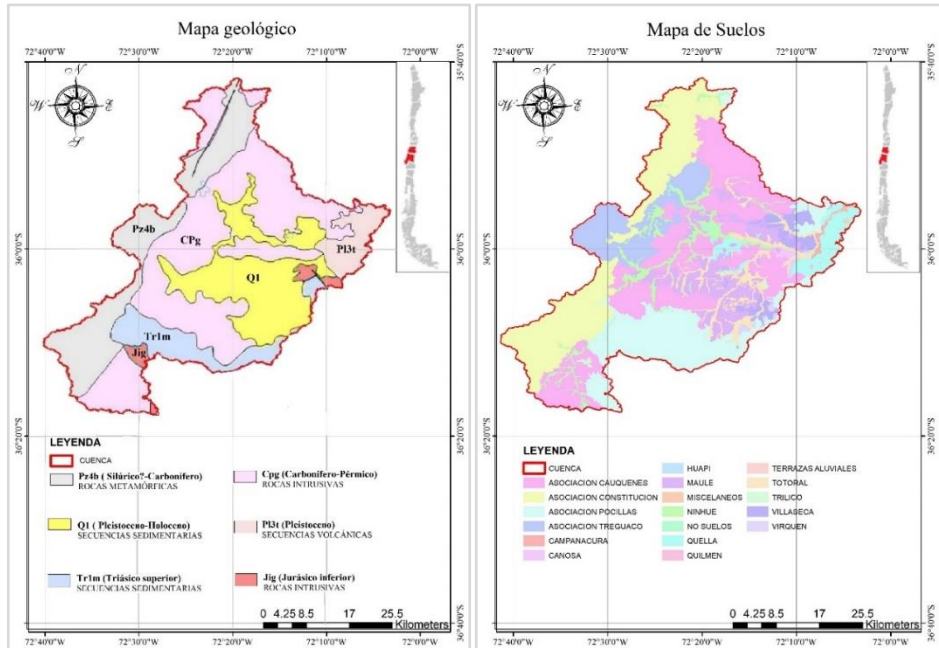
Anexo 1. Climograma estación meteorológica de Cauquenes de los periodos 1979-2009 y 2010-2019.



Anexo 2. Mapa de pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff (2006).



Anexo 3. Adaptación del Mapa Geológico de Chile (Sernageomin, 2003) (izquierda); mapa de las Series y Asociaciones de suelos (CIREN, 1997) (derecha) presenten en la cuenca de estudio.



Anexo 4. Comparación de las Asociaciones/Series de suelos de la cuenca (CIREN, 1997).

| Serie/ Asociación | Posición | Orden | Material Parental | Tipo | Textura |
|----------------------------|--|-----------------|--|-------------------|---|
| Asociación Cauquenes | Cerros y lomajes dentro de la Cordillera de la Costa | Alfisol | Roca granítica (rica en cuarzo y feldespatos) | <i>In situ</i> | Arcillosas en todo el perfil |
| Asociación Pocilla | Cerros y lomajes dentro de la Cordillera de la Costa | Alfisol | Rocas metamórficas | <i>In situ</i> | Franco arcillosa superficie a arcillo limosa en profundidad |
| Asociación Constitución | Cerros y lomajes en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa | Alfisol | Rocas metamórficas (pizarras) | <i>In situ</i> | Franco arcillo arenosa en superficie a franco arcillo limosa en profundidad |
| Asociación Treguaco | Sectores altos y la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa en contacto con la formación granítica | Incepti- sol | Rocas metamórficas (Micasitas y gneis, rica en mica y cuarzo) | <i>In situ</i> | Franco arcillo limosa en todo el perfil |
| Serie Maule | Terraza aluvial remanente | Alfisol | Sustrato aluvial antiguo | Sedimen- tario | Franco arcillo arenosa en superficie a arcillosa en profundidad |

Anexo 5. Parámetros propuestos para el modelo S-shaped (Grinevskii, 2011).

| Vegetation | Soil | h_{50} (m) | τ |
|------------|------------|--------------|--------|
| Tree | Loam | -37.3 | 2 |
| | Loamy sand | -33.3 | |
| | Sand | -15.0 | |
| Grass | Loam | -45.5 | 4 |
| | Loamy sand | -31.9 | |
| | Sand | -24.0 | |

Anexo 6. Calibración inversa de parámetros a través de HYDRUS-1D (Simunek et al., 2013).

La función objetivo a minimizar para optimizar un parámetro de suelo es la siguiente:

$$\Phi(\beta, q, p) = \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} w_{i,j} [q_j^*(x, t_i) - q_j(x, t_i, \beta)]^2 +$$

$$\sum_{j=1}^{m_p} v_j \sum_{i=1}^{n_{pj}} w_{i,j} [p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, \beta)]^2 +$$

$$\sum_{j=1}^{n_b} \hat{v}_j [\beta_j^* - \beta_j]^2$$

Donde la primera línea de la función representa la desviación entre lo medido ($q_j(x, t_i)$) y lo simulado ($q_j(x, t_i, b)$) en el espacio-tiempo de la variable de contenido de agua en el suelo. El m_q es el número del conjunto de diferentes mediciones y el n_{qj} es el número de mediciones dentro de un conjunto, v_j y w_{ij} son ponderaciones asociadas a las mediciones. La segunda línea es la diferencia entre las medidas del parámetro de suelo y las predichas para ese mismo parámetro. La última línea de la función es una penalización por la desviación entre el conocimiento previo del parámetro optimizado y sus estimaciones finales. Para mayor detalle revisar el manual de HYDRUS (Simunek et al., 2013).

Anexo 7. Explicación del método “Gap Fraction” del CI-110 Plant Canopy Imager (Bio-Science, 2018).

El “Gap Fraction” costa de 3 pasos fundamentales:

1. Adquisición de la imagen
2. Clasificación de la imagen
3. Cálculos

En el paso 1 para la adquisición de la imagen hay que tener en consideración dos aspectos importantes antes de capturar la imagen, primero es la orientación de la imagen, esta debe ser orientada hacia el norte con la ayuda de un marcador que hay en la pantalla del equipo. La segunda consideración es la exposición de la imagen, esta se debe ajustar antes de tomar la imagen, para que la cantidad de luz que entra en el equipo permita ver claramente la diferencia entre el cielo despejado y el follaje.

El paso 2 es donde se clasifica la imagen en follaje versus cielo visible. Este proceso se realiza a través de un método de segmentación de imagen llamado umbralización. Primero, la captura original se convierte en una imagen en escala de grises. Luego, a través del método mencionado se genera una imagen binaria de pixeles blancos y negros. Los pixeles blancos corresponden al cielo visible, mientras que los negros corresponden al follaje.

La umbralización (thresholding) es un método de segmentación que se basa en el análisis del histograma de las diferentes intensidades de los pixeles en la escala de grises. Se asigna un “umbral” el cual define el límite que separa los pixeles que corresponderán a follaje de los que son cielo visible. Debido a esta razón es por la que se recomienda tomar la imagen en condiciones de luz difusa, ya que, con un cielo variable como lo es al medio día, habrá distintas intensidades en el cielo que harán el proceso de umbralización menos preciso.

En el paso 3 ya se tiene la imagen clasificada, por lo que el “Gap Fraction” se puede comenzar a analizar. Cada sector de la imagen (según las divisiones cenitales) tendrá un valor que fluctúa entre 0 y 1, donde 0 corresponde a solo follaje y 1 a solo cielo visible. Es importante recordar que dentro de cada área hay una serie de pixeles que se clasificaron en el paso anterior y que la integración de sus valores dará el “Gap Fraction” para cada área. El valor del “Gap Fraction” corresponderá al coeficiente de transmisión de la luz.

Finalmente, para calcular el *IAF* de la canopia, el instrumento debe tener el “Gap Fraction” y se deriva el coeficiente de extinción (k) a través de las ecuaciones que se presentaran a continuación (Norman and Campbell, 1986; Norman and Campbell, 1986).

Índice de área foliar:

$$\tau_{\varphi_i} = e^{-K_{\varphi_i} IAF} \quad (\text{ec.1})$$

Donde τ_{φ} es el coeficiente de transmisión de penetraciones de los rayos (o la fracción del cielo visible) en cada área de ángulo cenital, K_{φ} es el coeficiente de extinción en cada ángulo cenital, i es la división del ángulo del ceniti-ésimo y *IAF* es el Índice de área foliar.

Coeficiente de extinción:

$$K_{\varphi_i} = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2 \varphi_i}}{x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733}} \quad (\text{ec.2})$$

Donde x : distribución del ángulo de la hoja (Norman and Campbell, 1989).

La ecuación 1 se resuelve encontrando valores para x e *IAF* que minimizan la siguiente función utilizando un análisis de regresión de mínimos cuadrados.

$$F = \sum (\ln \tau_i + K(\varphi_i, x))^2 \quad (\text{ec.3})$$

Sujeto a la restricción de que $x > 0$. El mínimo se encuentra resolviendo $\partial F / \partial IAF = 0$ y $\partial F / \partial x$, simultáneamente. La ecuación 1 da como resultado:

$$IAF = - \sum [K(\varphi_i, x) \ln \tau_i] / \sum K(\varphi_i, x)^2 \quad (\text{ec.4})$$

Y la ecuación 2:

$$IAF = -\frac{\sum [\ln \tau_i \partial K(\varphi_i, x) / \partial x]}{\sum [K(\varphi_i, x) \partial K(\varphi_i, x) / \partial x]} \quad (\text{ec.5})$$

Para resolver, IAF puede ser eliminado entre la ecuación 4 y 5 y x encontrado por el método de bisección. Una vez que se conoce x , IAF se puede resolver a partir de la ecuación 1.

Anexo 8. Principio de los sensores FDR.

El principio de los FDR es la reflexión que experimenta un pulso electromagnético cuando es transmitidos al suelo a través de electrodos (Paltineanu y Starr, 1997). Se mide la frecuencia de resonancia del circuito formado por los electrodos y el suelo tras la emisión del pulso. El pulso enviado a través del suelo no solo es reflejado, sino que sufre una atenuación proporcional a la conductividad eléctrica (CE) del mismo. Esta situación se utiliza para la estimación de la CE aparente del suelo mediante reflectometría, por lo tanto, la estimación del contenido de agua se determina en base a los cambios en la constante dieléctrica del medio.

La constante dieléctrica global de un medio está determinada por el conjunto de constantes de cada uno de los componentes que posea, tal como lo define la ecuación 1 de Hasted (1973):

$$\varepsilon_m = \left[\varepsilon_h^{\frac{1}{3}} + p \left(\varepsilon_{inc}^{\frac{1}{3}} - \varepsilon_h^{\frac{1}{3}} \right) \right]^3 \quad (\text{ec.1})$$

donde ε_m es la constante o permisividad dieléctrica global, ε_h la del sustrato y ε_{inc} la del material añadido en una proporción p .

En los materiales del suelo como los son las arcillas, arenas y materia orgánica la constante fluctúa de 2 a 7, la del aire es aproximadamente 1 y la del agua es de 80; por lo tanto, la ε_m del suelo estará condicionada al contenido de agua que dicho cuerpo posea (Lide, 1993).

Anexo 9. Medición de resistividad a través de Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) (Santander, 2020).

| N | Resistividad | Profundidad (m) |
|---|--------------|--------------------|
| 1 | 4696 | 0-0,82 |
| 2 | 659 | 0,82-3,42 |
| 3 | 11,3 | 3,42-12,5 |
| 4 | 2,26 | >12,5 |

Anexo 10. Método Delta para escenarios de cambio climático (Quilbé et al., 2008).

El *delta* consiste en construir la diferencia en las temperaturas (ΔT°) de los MCG que hay entre el periodo futuro (2020-2046) y el periodo de referencia (1979-2005) (ecuación 1 y 2). En el caso de las precipitaciones se calcula la relación (rPP) entre ambos periodos (ecuación

3). Luego, el factor de ajuste calculado se suma a las temperaturas del CR2MET (ecuación 4 y 5), mientras que las precipitaciones de la estación Essam se multiplican por el factor obtenido (ecuación 6).

$$\Delta T_{\min}(m) = \frac{1}{37} \left(\sum_{y=2020}^{2046} T^{\circ}_{\min_{MCG}}(m, y) - \sum_{y=1979}^{2005} T^{\circ}_{\min_{MCG}}(m, y) \right) \quad (\text{ec.1})$$

$$\Delta T^{\circ}_{\max}(m) = \frac{1}{37} \left(\sum_{y=2020}^{2046} T^{\circ}_{\max_{MCG}}(m, y) - \sum_{y=1979}^{2005} T^{\circ}_{\max_{MCG}}(m, y) \right) \quad (\text{ec.2})$$

$$rPP(m) = \frac{\sum_{y=2020}^{2046} PP_{MCG}(m, y)}{\sum_{y=1979}^{2005} PP_{MCG}(m, y)} \quad (\text{ec.3})$$

$$T^{\circ}_{\min_{futura}}(s, i, m) = T^{\circ}_{\min_{presente}}(s, i, m) + \Delta T_{\min}(m) \quad (\text{ec.4})$$

$$T^{\circ}_{\max_{futura}}(s, i, m) = T^{\circ}_{\max_{presente}}(s, i, m) + \Delta T_{\max}(m) \quad (\text{ec.5})$$

$$PP_{futura}(s, i, m) = PP_{presente}(s, i, m) \cdot rPP(m) \quad (\text{ec.6})$$

Donde m es el mes (1 al 12), y es el año, s es la grilla del CR2MET o la estación Essam e i es el día. Los supuestos del método *delta* son: el efecto del cambio climático es temporalmente homogéneo a lo largo de cada mes y homogéneo espacialmente en la cuenca; la ocurrencia de precipitaciones permanece igual entre periodos pasado y futuros; los MCG predicen de manera fiable las precipitaciones y temperaturas mensuales a nivel del suelo (Quilbé et al., 2008).

Anexo 11. Variación (%) en las precipitaciones y temperaturas en los escenarios futuros según Galleguillos et al. (2021).

11.1 Variación (%) en las precipitaciones mensuales en los escenarios futuros.

| Esc. ¹ | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pes. | -42,8 | -22,6 | -32,6 | -36,3 | -26,5 | -20,7 | -18,4 | -15,2 | -33,4 | -21,3 | -35,5 | -30,4 |
| Med. | -20,5 | -6,6 | -8,0 | -21,6 | -8,4 | -6,8 | -6,0 | -2,6 | -18,1 | -11,0 | -17,8 | -14,1 |
| Opt. | -6,9 | +26,4 | +8,8 | -2,5 | -0,2 | +3,7 | +8,2 | +19,7 | -3,2 | +4,5 | +10,9 | +3,1 |

¹Pes: pesimista, Med: mediano, Opt: optimista.

11.2. Variación (°) en las temperaturas máximas mensuales en los escenarios futuros.

| Esc. ¹ | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pes. | +1,7 | +1,6 | +1,4 | +1,4 | +1,2 | +0,9 | +1,0 | +1,1 | +1,2 | +1,1 | +1,3 | +1,5 |
| Med. | +1,2 | +1,4 | +1,1 | +1,1 | +0,8 | +0,7 | +0,8 | +0,9 | +0,9 | +1,0 | +1,1 | +1,2 |
| Opt. | +1,0 | +1,1 | +1,0 | +0,8 | +0,6 | +0,6 | +0,6 | +0,5 | +0,7 | +0,7 | +0,8 | +0,9 |

¹Pes: pesimista, Med: mediano, Opt: optimista.

11.3. Variación (°) en las temperaturas mínimas mensuales en los escenarios futuros.

| Esc. ¹ | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pes. | +1,4 | +1,4 | +1,2 | +1,1 | +0,9 | +0,8 | +0,9 | +0,9 | +0,9 | +0,8 | +1,1 | +1,3 |
| Med. | +1,0 | +1,2 | +1,0 | +0,9 | +0,8 | +0,6 | +0,8 | +0,7 | +0,7 | +0,6 | +0,8 | +1,0 |
| Opt. | +0,8 | +1,0 | +0,9 | +0,6 | +0,6 | +0,4 | +0,6 | +0,5 | +0,5 | +0,5 | +0,7 | +0,7 |

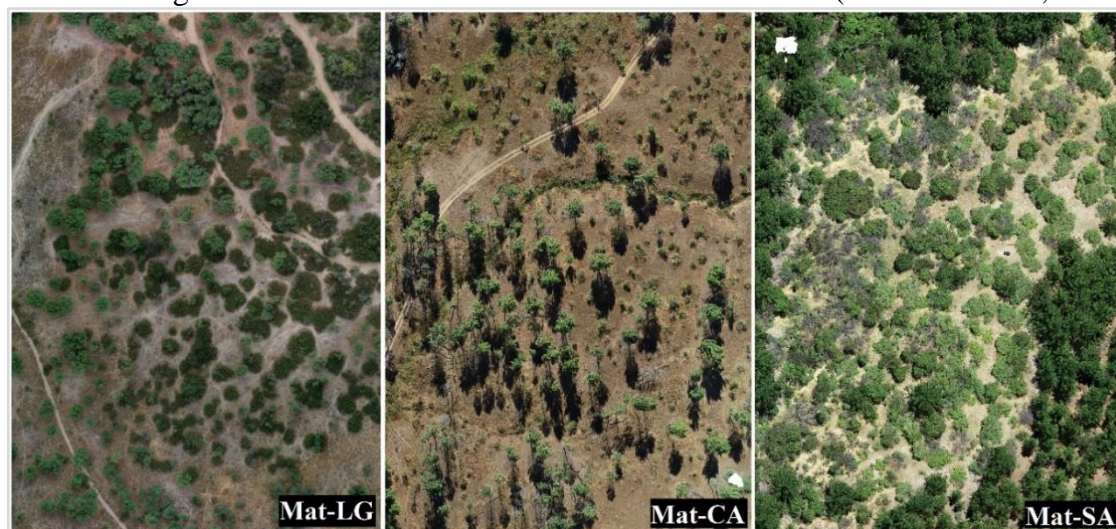
¹Pes: pesimista, Med: mediano, Opt: optimista.

Anexo 12. Valores de conductividad hidráulica saturada (K_s) y del parámetro α y n del modelo de retención de agua de van Genuchten para distintos tipos de suelo (Carsel y Parrish, 1988).

| Soil Type | Hydraulic Conductivity K_s , cm hr^{-1} | | | | α , cm^{-1} | | | | N | | | |
|--------------------|--|-------|-------|------|----------------------|-------|-------|------|-----------|------|------|------|
| | \bar{x} | s | CV | n | \bar{x} | s | CV | n | \bar{x} | s | CV | n |
| Clay* | 0.20 | 0.42 | 210.3 | 114 | 0.008 | 0.012 | 160.3 | 400 | 1.09 | 0.09 | 7.9 | 400 |
| Clay loam | 0.26 | 0.70 | 267.2 | 345 | 0.019 | 0.015 | 77.9 | 363 | 1.31 | 0.09 | 7.2 | 364 |
| Loam | 1.04 | 1.82 | 174.6 | 735 | 0.036 | 0.021 | 57.1 | 735 | 1.56 | 0.11 | 7.3 | 735 |
| Loamy sand | 14.59 | 11.36 | 77.9 | 315 | 0.124 | 0.043 | 35.2 | 315 | 2.28 | 0.27 | 12.0 | 315 |
| Silt | 0.25 | 0.33 | 129.9 | 88 | 0.016 | 0.007 | 45.0 | 82 | 1.37 | 0.05 | 3.3 | 82 |
| Silt loam | 0.45 | 1.23 | 275.1 | 1093 | 0.020 | 0.012 | 64.7 | 1093 | 1.41 | 0.12 | 8.5 | 1093 |
| Silty clay | 0.02 | 0.11 | 453.3 | 126 | 0.005 | 0.005 | 113.6 | 126 | 1.09 | 0.06 | 5.0 | 374 |
| Silty clay loam | 0.07 | 0.19 | 288.7 | 592 | 0.010 | 0.006 | 61.5 | 641 | 1.23 | 0.06 | 5.0 | 641 |
| Sand | 29.70 | 15.60 | 52.4 | 246 | 0.145 | 0.029 | 20.3 | 246 | 2.68 | 0.29 | 20.3 | 246 |
| Sandy clay | 0.12 | 0.28 | 234.1 | 46 | 0.027 | 0.017 | 61.7 | 46 | 1.23 | 0.10 | 7.9 | 46 |
| Sandy clay loam | 1.31 | 2.74 | 208.6 | 214 | 0.059 | 0.038 | 64.6 | 214 | 1.48 | 0.13 | 8.7 | 214 |
| Sandy loam | 4.42 | 5.63 | 127.0 | 1183 | 0.075 | 0.037 | 49.4 | 1183 | 1.89 | 0.17 | 9.2 | 1183 |

Here, \bar{x} , mean; s , standard deviation; CV, coefficient of variation (percent); and n , sample size. *Agricultural soil, less than 60%.

Anexo 13. Imágenes de dron de cada uno de los sitios de matorral (Fassnacht et al., 2021).



Anexo 14. Contenidos de materia orgánica (%) en cuatro de los sitios de estudio (Macari, 2019).

| Horizonte | pino SP | pino SA | matorral CA | matorral SA |
|-----------|---------|---------|-------------|-------------|
| 1 | 2,02 | 9,20 | 8,40 | 2,83 |
| 2 | 2,25 | 3,04 | 4,90 | 1,40 |
| 3 | 2,25 | 1,82 | 5,00 | 0,80 |

Anexo 15. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la agenda 2030 de Naciones Unidas son:

1. Erradicar la pobreza en todas sus formas en todo el mundo.
2. Poner fin al hambre, conseguir la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible.
3. Garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todos y todas en todas las edades.
4. Garantizar una educación de calidad inclusiva y equitativa, y promover las oportunidades de aprendizaje permanente para todos.
5. Alcanzar la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y niñas.
6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.
7. Asegurar el acceso a energías asequibles, fiables, sostenibles y modernas para todos.
8. Fomentar el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos.
9. Desarrollar infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.
10. Reducir las desigualdades entre países y dentro de ellos.
11. Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.
12. Garantizar las pautas de consumo y de producción sostenibles.
13. Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
14. Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, mares y recursos marinos para lograr el desarrollo sostenible.
15. Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica.
16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles.
17. Fortalecer los medios de ejecución y reavivar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**EFFECTO DEL REEMPLAZO DEL MATORRAL NATIVO POR
PLANTACIONES DE PINO EN LA EVOPOTRANSPIRACIÓN REAL
Y PERCOLACIÓN PARA EL PERIODO HISTÓRICO Y FUTURO EN
LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES**

**EFFECT OF NATIVE SHRUBLAND REPLACEMENT BY PINE
PLANTATIONS ON ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION AND
PERCOLATION FOR HISTORICAL AND FUTURE PERIODS IN
THE CAUQUENES RIVER BASIN**

Tesis para optar al título de Ingeniera Agrónoma y
al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

ELIZABETH VIRGINIA RAMÍREZ ZAMORANO

Director de Tesis
Dr. Mauricio Galleguillos Torres
Dr. Oscar Seguel Seguel

Profesores consejeros
Dr. Cristian Kremer Fariña
Dr. Juan Pablo Fuentes Espoz

SANTIAGO - CHILE
2021