



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

**Comparación de la eficiencia del uso de agua entre una
plantación de *Pinus radiata* y una de *Eucalyptus globulus*
en la zona del secano interior de la VII Región de Chile**

Patrocinante: Sr. Anton Huber.

Trabajo de Titulación presentado
como parte de los requisitos para optar
al Título de **Ingeniero Forestal**.

ANDRÉS RENÉ GONZÁLEZ LOYOLA

VALDIVIA
2003

CALIFICAIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Antón Huber Jaeger	6,0
Informante:	Sr. Rubén Peñaloza Wineken	6,3
Informante:	Sr. Andrés Iroumé Arrau	6,0

El patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Antón Huber G.

Agradecimientos

Agradezco muy sinceramente a todas las personas e instancias que directa o indirectamente influyeron positivamente en el desarrollo del presente trabajo:

- Al proyecto Fondecyt n° 1010713.
- Al profesor Anton Huber por la confianza y seriedad con que fue desarrollado el presente trabajo, sus acertados consejos y opiniones facilitaron enormemente el desarrollo del trabajo.
- Al profesor Ramiro Trecaman por su buena disposición al trabajo, por poseer semejante base de datos en la cabeza!!, y por desarrollar el trabajo siempre en un distendido ambiente de amistad y compañerismo.
- A mis padres y hermanos que con esfuerzo y sacrificios me han apoyado en todo momento durante mis estudios en Valdivia.
- A Florencia y Javiera por el amor, la paciencia y especialmente por el tiempo que, perteneciéndole a ellas, fue dedicado a la realización de este trabajo.
- A la familia Moreno Carrasco por su "apoyo logístico" y por hacerme saber que en Valdivia siempre tengo un lugar para sentirme "como en casa".
- Finalmente quiero agradecer muy sinceramente a todos mis "Crabros" y "Monos", Pato, Yuey, Checha, Porota, Yetty, Darián, Loco, Buca, Dani, Karla, Jorge (Dj Larva), Atorty, Richard Burns y Cabecita entre otros, a todos ellos gracias por hacer de Valdivia un "verde oasis" donde, cual ingeniero forestal, pude cultivar lo mejor de mi y lo mejor de ustedes, una gran amistad.

Gracias.

Dedicado a Javiera Florencia,
*No hay nada mas maravillosos que oír tu voz
y verte sonreír.*

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEORICO	3
2.1 Redistribución de las precipitaciones	3
2.2 Evapotranspiración	4
2.3 Contenido de humedad del suelo	5
2.4 Eficiencia del uso de agua	6
3. DISEÑO EXPERIMENTAL	8
3.1 Ubicación de las áreas de estudio	8
3.2 Características de los rodales	9
3.3 Suelo	9
3.4 Clima	9
3.5 Período de mediciones	9
3.6 Precipitaciones	10
3.7 Precipitación neta	10
3.8 Pérdidas de agua por intercepción del dosel	10
3.9 Pérdidas de agua por percolación	11
3.10 Contenido de humedad del suelo	11
3.11 Determinación del consumo de agua por evapotranspiración neta	11
3.12 Productividad de los rodales y eficiencia del uso de agua	12
4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	13
4.1 Precipitaciones	13
4.2 Redistribución de las precipitaciones	14
4.3 Variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo	17
4.4 Consumo de agua por evapotranspiración neta	21
4.5 Incremento en volumen	23
4.6 Relación entre el consumo de agua por evapotranspiración neta y el incremento volumétrico	25
4.7 Eficiencia del uso de agua	27
5. CONCLUSIONES	29

6.	BIBLIOGRAFÍA	31
	ANEXOS	34
1	<i>Abstract</i>	
2	Análisis de normalidad y prueba Mann–Whitney para las precipitaciones en Cajones y Lircay.	
3	Análisis de normalidad y prueba Mann–Whitney para el consumo de agua por evapotranspiración neta en Cajones y Lircay.	
4	Análisis de normalidad y prueba t para el incremento corriente anual en volumen en Cajones y Lircay.	
5	Ajuste de modelos que relacionan la evapotranspiración neta y el incremento en volumen para Cajones y Lircay.	

RESUMEN EJECUTIVO

Se determinó y comparó la eficiencia del uso de agua (EDA) de un rodal de *Pinus radiata* y uno de *Eucalyptus globulus* ubicados en la zona del secano interior, VII Región de Chile. El rodal de *Pinus radiata* (Cajones) de 8 años de edad presenta una densidad de 1250 árboles/ha, el rodal de *Eucalyptus globulus* (Lircay) de 9 años de edad presenta una densidad de 1400 árboles/ha. Para determinar la eficiencia del uso de agua se midieron los aportes de agua por precipitación y su posterior redistribución, el contenido de humedad del suelo, la evapotranspiración neta y los incrementos en volumen fustal para cada uno de los rodales.

Producto de la mayor precipitación incidente y de las menores pérdidas por interceptación, el rodal de *Eucalyptus globulus* registró un mayor aporte para las reservas de agua en el suelo.

De acuerdo a lo anterior, la evapotranspiración neta fue mayor en Lircay a pesar de presentar una baja presencia de herbáceas en comparación con Cajones, esto significa que el consumo de agua en Lircay es producto en mayor medida de los árboles, lo que explica los mayores incrementos volumétricos registrados en este rodal.

Los bajos coeficientes de determinación para los modelos que relacionan la evapotranspiración neta y el incremento en volumen (0,27 y 0,42 para Cajones y Lircay respectivamente), pueden explicarse debido a que durante períodos de escasez de agua se produce un aumento del déficit de presión de vapor, lo que trae como consecuencia un cierre estomático por parte de los árboles, que reduce la transpiración mas que la fotosíntesis, produciéndose una disminución mas importante en la evapotranspiración que en el incremento en volumen por hectárea.

Los valores anuales de la eficiencia del uso de agua registrados en Cajones y Lircay son de 0,00209 y 0,00281 respectivamente. Esto implica que el rodal de *Eucalyptus globulus* emplea una menor cantidad de agua evapotranspirada (mm) por m³/ha de incremento volumétrico en comparación con el rodal de *Pinus radiata*.

Los valores de tasa de transpiración indican que para *Eucalyptus globulus* se requieren 354,6 m³ de agua para producir 1m³/ha de madera en comparación con los 478,5 m³ necesarios en *Pinus radiata*.

Palabras claves: Eficiencia del uso de agua, Evapotranspiración neta, Incremento en volumen, *Pinus radiata*; *Eucalyptus globulus*.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los efectos del agua sobre los árboles, de las fuentes de agua para las plantas y de las pérdidas de agua que experimenta el bosque, son de extraordinaria importancia para quienes se ocupan de las Ciencias Forestales (Donoso, 1994).

Para la silvicultura, el conocimiento de las interacciones entre el ciclo del agua y el desarrollo de la vegetación, es una efectiva herramienta para la toma de decisiones en cuanto a la especie y manejo más adecuados en una determinada zona. Esta situación se torna particularmente importante en zonas con climas mediterráneos donde el déficit hídrico se transforma en el factor determinante para el desarrollo de la vegetación.

El desarrollo de la actividad forestal en Chile se basa principalmente en las plantaciones de especies exóticas, las que en la actualidad cubren una superficie aproximada de 2,1 millones de hectáreas, equivalentes al 13,5% de la superficie boscosa del país, aproximadamente el 75% de esta superficie corresponde a plantaciones de *Pinus radiata* y el 18% a especies del género *Eucalyptus*, las que se encuentran establecidas principalmente entre las regiones V y X (CONAF, 1999).

La zona del secano interior de Chile corresponde a un territorio de más de 1,5 millones de hectáreas, donde los suelos han sido agotados debido a prácticas agrícolas inadecuadas, transformándose en una zona de un alto potencial y presión por forestar.

El estudio de la eficiencia del uso de agua entrega interesante información acerca de la relación existente entre la utilización del recurso hídrico por parte de la vegetación y su incremento en biomasa, siendo este de especial importancia para zonas donde el agua es una limitante para el desarrollo de la vegetación como es el caso de la zona secano interior de Chile.

En el presente estudio se plantea la hipótesis de que existiría una diferencia en la eficiencia del uso de agua entre una plantación de *Pinus radiata* y una *Eucalyptus globulus*, la que estaría dada por diferencias en el consumo de agua y en los incrementos volumétricos de las distintas plantaciones.

El objetivo general de este trabajo es comparar la eficiencia del uso del agua (EUA), de una plantación de *Pinus radiata* y una de *Eucalyptus globulus* en la zona secano interior centro de Chile.

Para lograr el objetivo general, es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la redistribución de las precipitaciones.
- Determinar el contenido de agua del suelo estableciendo su variación temporal y espacial.

- Determinar la cantidad de agua involucrada en el proceso de evapotranspiración.
- Determinar los incrementos volumétricos de las plantaciones.
- Establecer relaciones entre la tasa de transpiración y el crecimiento en volumen de las plantaciones.
- Comparar tales relaciones entre las plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Redistribución de las precipitaciones

Las precipitaciones sufren una redistribución al entrar en contacto con una cubierta boscosa, la cual está relacionada directamente con las características de las lluvias y las especies, la estructura del dosel, la topografía, las características climáticas y el manejo del bosque (Oyarzún *et al.*, 1985).

Por otro lado, hay una fracción de la misma que no alcanza el suelo y es devuelta a la atmósfera por evaporación. Ello implica que esa fracción de precipitación no puede ser aprovechada por la vegetación ni contribuye a alimentar los recursos hídricos (López y Blanco, 1978).

La parte de las precipitaciones que alcanza directamente el suelo a través de la cubierta boscosa más aquella que gotea desde el dosel se denomina precipitación directa.

La fracción que no alcanza la superficie del suelo y que es retenida por el dosel para luego ser devuelta a la atmósfera por evaporación se denomina pérdida de agua por interceptación, y depende principalmente de la especie, estructura del bosque, duración e intensidad de las precipitaciones y de las condiciones meteorológicas (Huber y Oyarzún, 1984).

El fenómeno de interceptación de las precipitaciones es especialmente importante en zonas con déficit hídrico. Eventos de precipitaciones cortos y de baja intensidad pueden llegar a ser totalmente interceptados y vueltos a la atmósfera por evaporación dependiendo de la capacidad de almacenaje del dosel (Dunkerley, 2000).

Parte de la precipitación que es interceptada por la cubierta vegetal y que escurre por el tronco de los árboles para llegar al suelo, se denomina escurrimiento fustal (Oyarzún *et al.*, 1985).

Esta porción de agua se ve afectada por la continuidad y proporción de períodos secos, por la intensidad y duración de las precipitaciones y por el ángulo de lluvia, el cual es particularmente importante en bosques con dosel abierto donde el escurrimiento fustal puede comenzar por solo un lado del fuste (Crockford y Richardson, 2000).

El agua aportada al suelo por escurrimiento fustal llega directamente a la zona de raíces lo que incrementa la eficiencia en la captación de agua por parte de estas (Dunkerley, 2000).

Respecto a los aportes de escurrimiento fustal por árbol en plantaciones de *Pinus radiata*, dependen principalmente de la magnitud del área de copas (Oyarzún *et al.*, 1985).

De la cantidad total de agua que finalmente llega al suelo, una parte puede escurrir superficialmente y otra infiltrarse en éste, determinando de esta manera la cantidad de agua que queda disponible para la cubierta vegetal y la que finalmente percola.

Estudios han concluido que la cantidad de agua que alcanza la superficie del suelo en plantaciones de *Pinus radiata*, depende fundamentalmente de la densidad del bosque, cobertura de copas e intensidad de las precipitaciones (Oyarzún *et al.*, 1985).

2.2 Evapotranspiración

En una superficie cubierta en mayor o menor grado con vegetación, existe una evaporación directa desde el suelo y una extracción de humedad por transpiración.

Estos procesos indudablemente han de influenciarse mutuamente ante condiciones meteorológicas definidas y un contenido de humedad existente en el suelo, lo que justifica el concepto de evapotranspiración para englobar en un fenómeno único la evaporación total.

Al integrar las complejas interacciones de los factores clima y suelo, el concepto de evapotranspiración se transforma en una herramienta de importancia desde el punto de vista de la producción forestal (Wickramasinghe, 1998).

En un suelo que deja de saturarse y que por lo tanto disminuye su contenido de humedad, la percolación se hace nula o despreciable por lo que la disminución del contenido de humedad del suelo es producto de la evaporación de éste y del consumo de la cubierta vegetal (Huber *et al.*, 1985).

Existen dos conceptos relacionados a la evapotranspiración, los cuales dependen de la disponibilidad de agua por parte de la vegetación.

El primero es la evapotranspiración potencial, la cual se define como la evapotranspiración máxima que se produciría en una superficie cubierta de vegetación, si la humedad del suelo fuera adecuada para permitir libremente la transpiración de la vegetación (Donoso, 1994).

Esta por lo tanto depende solo de factores atmosféricos tales como radiación incidente, humedad relativa, temperatura del aire y velocidad del viento.

El segundo concepto es la evapotranspiración real, la cual depende de la disponibilidad de agua en el suelo, por lo que al existir déficit hídrico su valor es inferior a la evapotranspiración potencial.

El concepto adecuado para estudios de balance hídrico en plantaciones es el de evapotranspiración neta, la que se define como el total de agua evaporada desde el suelo más el agua transpirada por los vegetales la cual depende de la cantidad de agua disponible en el suelo, las características de la vegetación y las condiciones meteorológicas (Novoa, 1998; Putuhena y Cordery, 2000).

La evapotranspiración está regulada por distintos factores entre los cuales se puede mencionar la energía disponible para producir la evaporación del agua, el déficit de saturación de la atmósfera, la temperatura del aire y la velocidad del viento (Kramer, 1974; Martínez De Azagra y Navarro, 1996).

Otro factor de suma importancia en la regulación de la evapotranspiración es la capacidad que posee el suelo para retener el agua, lo que a su vez depende de la porosidad, granulometría y del tipo de suelo (Donoso, 1994).

Fernández (1996), resume los mecanismos que condicionan la evapotranspiración en tres factores reguladores:

El primero es la energía necesaria para producir el cambio del agua de estado líquido a vapor, tal energía proviene de la radiación solar y la temperatura como manifestación de la energía disponible es el elemento climático de mayor importancia que interviene en este proceso.

El segundo factor es el déficit higrométrico, referido a la capacidad del aire para contener vapor de agua, tal capacidad está determinada por la tensión de vapor existente a una temperatura dada y por la tensión de saturación a esa misma temperatura, una mayor diferencia entre estas variables se traduce en una mayor capacidad del aire para contener vapor de agua.

Por último, el tercer factor se refiere a las características propias que posee el suelo como superficie evaporante, la capacidad del suelo para retener el agua y la presencia de una cubierta vegetal la cual implica un proceso de transpiración complementario a la evaporación.

2.3 Contenido de humedad del suelo

El agua que infiltra en el suelo es retenida durante mayor o menor tiempo en él por fuerzas de adhesión, cohesión y tensión superficial, que permiten clasificarla desde el punto de vista físico en tres formas diferentes, pero que no están separadas por límites precisos. Estas formas son agua gravitacional, agua capilar y agua higroscópica.

El agua gravitacional es el agua drenada a través de los macroporos por efecto de la fuerza de gravedad y que va a alimentar a las napas freáticas. El agua gravitacional desaloja el aire de los poros y satura el suelo después de una lluvia, luego el suelo

drena toda su agua gravitacional, y los poros vuelven a ser ocupados por el aire, momento que es óptimo para la vida del suelo, particularmente de las raíces.

Especies que poseen raíces profundas y bien desarrolladas están en condiciones óptimas para aprovechar el máximo de agua gravitacional; lo contrario ocurre con especies de raíces superficiales.

El agua capilar es la porción de agua que ha infiltrado en el suelo y que queda retenida alrededor de las partículas del suelo y en los microporos o poros capilares después que el agua gravitacional ha descendido a las capas inferiores del suelo.

El agua capilar es la clase de agua mas importante en el suelo, porque constituye la fuente de casi toda el agua que ocupan las plantas.

El agua higroscópica es aquella capa muy delgada de agua que queda retenida fuertemente por fuerzas de adhesión a las partículas del suelo, una vez que el suelo ha perdido toda su agua capilar.

Esta agua está fuertemente adherida al suelo que es imposible para las raíces poder absorberla, sin embargo puede evaporarse (Donoso, 1994).

Está generalmente aceptado que la vegetación toma agua del suelo y se desarrolla cuando el contenido de humedad del suelo se encuentra dentro de ciertos límites. Estos límites son la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente o de agotamiento (López y Blanco, 1978).

La capacidad de campo (C.C.) es la cantidad de agua que puede retener un suelo después que el agua gravitacional ha sido drenada, de tal modo que el contenido de agua alcanza un valor más o menos estable.

Este valor se usa como el más cercano a la humedad óptima del suelo que requieren las plantas (Donoso, 1994).

El punto de marchitez permanente es un valor que expresa el contenido de agua del suelo en el momento cuando las plantas que crecen en él se marchitan en forma permanente, a menos que se agregue agua al suelo. Es por lo tanto, una condición de humedad del suelo que se visualiza por su efecto sobre las plantas (Donoso, 1994).

2.4 Eficiencia del uso el agua (EUA)

La eficiencia del uso de agua puede definirse como la tasa de biomasa producida por unidad de volumen de agua evaporada (Eastham *et al.* 1990).

Esta es comúnmente expresada en función de la biomasa del vuelo, sin embargo en producción forestal es más útil emplear la biomasa fustal o volumen maderable (Sands y Mulligan, 1990).

Publicaciones recientes expresan la eficiencia del uso del agua como su valor recíproco, llamado tasa de transpiración. Esta indica la evapotranspiración involucrada (m^3) para producir una unidad de volumen (m^3) de materia seca maderable o fustal (Brady y Weil, 1999; Robinson *et al.*, 2001).

La eficiencia del uso de agua depende de factores genéticos, ambientales y de las características del rodal.

En cuanto a los factores genéticos, la eficiencia del uso de agua puede variar entre especies y entre familias. Sands *et al.* (1984) encontraron variaciones en la EUA entre familias de *Pinus radiata*.

Respecto a los factores ambientales, existe una tendencia general a una mayor eficiencia de uso de agua por parte de los árboles, hacia climas más desérticos en comparación con climas más húmedos.

Condiciones ambientales que favorecen el cierre de los estomas reducen la transpiración más que la fotosíntesis, produciéndose entonces un aumento de la eficiencia del uso de agua (Wuenschel y Kozlowski, 1971).

Fischer (1980) informa que la mayoría de la literatura señala que se produce un pequeño aumento de la eficiencia del uso del agua bajo un déficit hídrico del suelo.

Cuando el agua y nutrientes del suelo son limitados, los árboles invierten más productos asimilados en las raíces y menos en las hojas (Sands y Mulligan, 1990).

Dunin y Mackay (1982), registraron valores de eficiencia del uso de agua del orden de 1,0 en bosques de *Eucalyptus*, comparado con 2,5 en coníferas, medido en kg. de materia seca por m^3 de agua evapotranspirada.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Ubicación de las áreas de estudio

El área de estudio corresponde a dos plantaciones ubicadas en la VII Región, zona del seco interior centro de Chile, en la figura 1 se muestra la ubicación de los rodales estudiados.

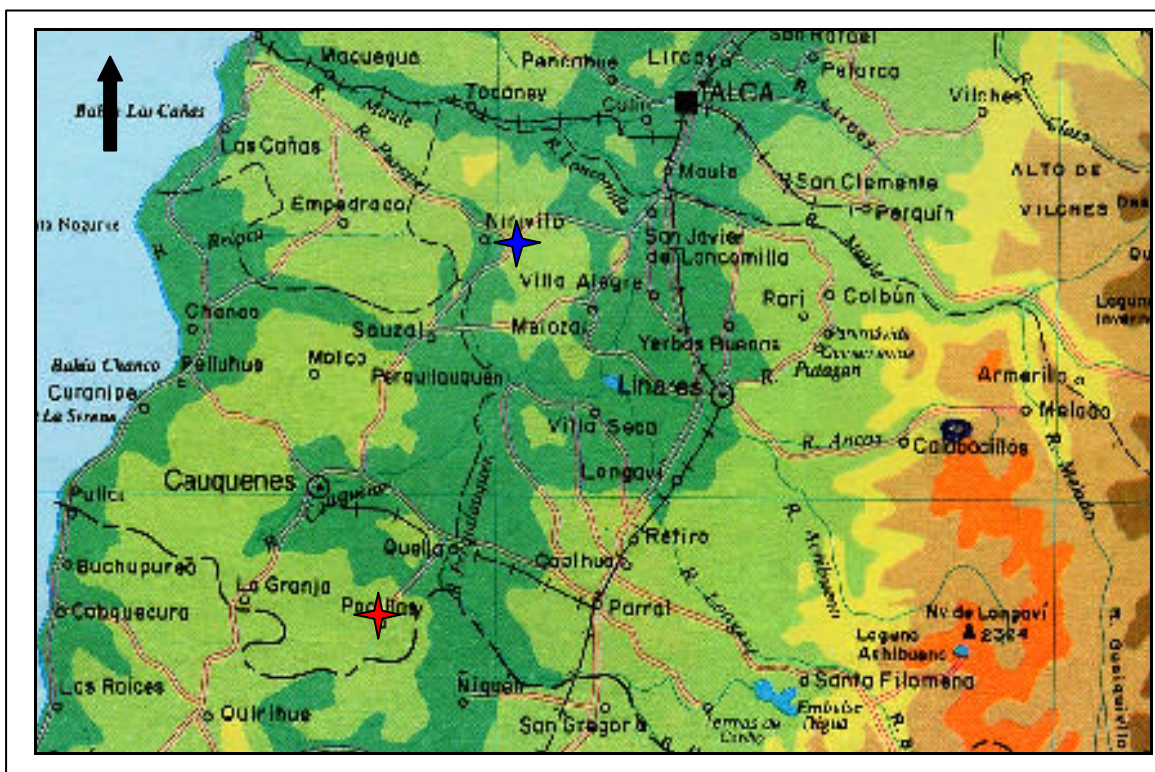


Figura 1. Ubicación rodales en estudio *Pinus radiata* (azul), *Eucalyptus globulus* (rojo).

La primera corresponde a una plantación de *Pinus radiata* de 8 años de edad, ubicada en el predio Cajones, provincia de Cauquenes, VII región, ($35^{\circ} 40'$ latitud sur y $71^{\circ} 49'$ longitud oeste), perteneciente a la Forestal Celco S.A.

La segunda zona corresponde a una plantación de *Eucalyptus globulus* de 9 años de edad, ubicada en el predio Lircay, provincia de Cauquenes, VII Región, ($36^{\circ} 10'$ latitud sur y $72^{\circ} 17'$ longitud oeste), perteneciente a la Forestal Celco S.A.

3.2 Características de los rodales

El cuadro 1 resume las principales características de los rodales en estudio.

Cuadro 1. Características de los rodales en estudio.

Rodal	Especie	Año de plantación	Densidad (árboles/ha)	Cobertura (%)	Serie de suelo
Cajones	<i>Pinus radiata</i>	1995	1250	78	Vaquería
Lircay	<i>Eucalyptus globulus</i>	1994	1400	81	Cauquenes

El sotobosque del rodal ubicado en Cajones está compuesto por las especies *Acacia caven*, *Lithraea caustica*, *Taraxacum officinale*, *Trifolium augustifolium*, *Briza maxima* y *Holcus lanatus*.

El sotobosque del rodal ubicado en Lircay está compuesto por las especies *Taraxacum officinale* y *Briza maxima*. En este rodal el sotobosque se presenta claramente mas ralo que en Cajones.

3.3 Suelo

El suelo del rodal de Cajones, plantado con *Pinus radiata*, corresponde a la serie Vaquería cuyo material de origen corresponde a limo sobre toba de composición mixta. Posee un drenaje externo bueno e interno imperfecto.

El suelo del rodal de Lircay, plantado con *Eucalyptus globulus*, corresponde a la serie Cauquenes cuyo material de origen corresponde a material intrusivo rico en cuarzo, granito o diorita cuarzosa. Posee drenaje externo e interno bueno.

3.4 Clima

La zona de estudio presenta un clima templado cálido con estación seca de 6 a 7 meses (Csb2), el cual se caracteriza por presentar precipitaciones que alcanzan valores superiores a los 700 mm, mostrando un régimen mediterráneo con una estación seca bien definida (Fuenzalida, 1971).

La precipitación media anual alcanza los 735 mm, la temperatura media anual máxima es de 21,1°C y la media anual mínima es de 7,7°C.

3.5 Período de mediciones

El estudio involucró datos obtenidos durante el período comprendido entre octubre del 2002 y septiembre del 2003.

3.6 Precipitaciones

La precipitación total se midió con pluviómetros los cuales se ubicaron en praderas cercanas a cada una de las áreas de estudio. Se asumió que los montos de precipitación medidos por los pluviómetros son los mismos que llegan sobre los rodales en estudio.

3.7 Precipitación neta

La precipitación neta (o aquella que efectivamente llega al suelo), se determinó para cada plantación por medio de la suma de la precipitación directa y el escurrimiento fustal.

La precipitación directa se midió por medio de canaletas metálicas de material galvanizado en forma de V, ubicadas a unos 30 cm del suelo, las cuales recolectaron y condujeron el agua a un tambor para su registro. Las canaletas poseen 13,5 cm de ancho por 25 m de largo, con una superficie de captación de 3,38 m².

El escurrimiento fustal se midió por medio de collarines de goma instalados en torno al fuste desde la altura del DAP hacia abajo, los cuales condujeron el agua hacia cañerías de PVC, las que finalmente desembocan en tambores para su registro. La medición del escurrimiento fustal se realizó en 10 árboles por rodal, extrapolando tal información por unidad de superficie por medio de la siguiente fórmula:

$$E_f = \frac{\text{litros de agua recolectados de árboles con collarines} \times \text{N}^\circ \text{ árboles/ha}}{\text{N}^\circ \text{ de árboles con collarines} \times 10.000 \text{ m}^2} \quad [1]$$

Donde E_f = Escurrimiento fustal (mm).

De esta forma la precipitación neta quedó determinada por la suma del escurrimiento fustal y la precipitación directa, tal como lo muestra la siguiente fórmula:

$$P_n = P_d + E_f \quad [2]$$

Donde:

P_n = Precipitación neta (mm).

P_d = Precipitación directa (mm).

E_f = Escurrimiento fustal (mm).

3.8 Pérdidas de agua por intercepción de dosel

La parte de las precipitaciones que se pierde por la intercepción del dosel se calculó por medio de la diferencia entre la precipitación total incidente sobre la vegetación y la precipitación neta obteniéndose la siguiente relación:

$$I = Pt - (Pd + Ef) \quad [3]$$

Donde:

I = Intercepción (mm).

Pt = Precipitación total (mm).

Pd = Precipitación directa (mm).

Ef = Escurrimiento fustal (mm).

3.9 Pérdidas de agua por percolación

Para determinar el volumen de agua percolada se utilizó la metodología propuesta en Huber y Trecaman (2002), la cual consiste en la instalación de bandejas recolectoras de agua, ubicadas horizontalmente a 3 m de profundidad.

Las bandejas recolectoras poseen una superficie de 900 cm² (30x30 cm), y una altura de 8 cm. Cada una de estas se conectó a un recolector con capacidad para 25 litros, desde el cual se extrae el agua percolada por medio de un tubo con ayuda de una bomba portátil.

Se instalaron 4 bandejas recolectoras por rodal, dos entre hileras y dos en hileras de manera de obtener mediciones representativas de la zona de estudio.

3.10 Contenido de humedad del suelo

La variación espacial y temporal del agua en el suelo se determinó mediante el uso de una sonda de neutrones Troxler Series 4300, para lo cual se instalaron 10 tubos hasta una profundidad de 3 m, los cuales se distribuyeron 5 entre hileras y 5 sobre hileras de manera de obtener un muestreo representativo de la zona de estudio.

3.11 Determinación del consumo de agua por evapotranspiración neta

Para determinar el consumo de agua por evapotranspiración neta se utilizó la siguiente ecuación que determina la evapotranspiración neta:

$$EVTn = Pn - \Delta W - Pe \quad [4]$$

Donde:

EVTn = Evapotranspiración neta (mm).

Pn = Precipitación neta (mm).

ΔW = Variación del contenido de agua del suelo (mm).

Pe = Percolación.

3.12 Productividad de los rodales y eficiencia del uso de agua

Para medir la productividad de los rodales en estudio se midieron las variables DAP y altura de 25 árboles por rodal de manera de obtener por medio de funciones los incrementos en volumen.

Los incrementos en volumen determinados con una frecuencia mensual se relacionaron con el consumo de agua por evapotranspiración neta. A partir de ello se determinó la eficiencia del uso del agua en términos de cantidad de agua necesaria para producir 1 m³ de biomasa fustal o tasa de transpiración.

De esta forma, la eficiencia del uso de agua (EUA) queda determinada por la siguiente relación:

$$EUA = \Delta V / EVTn * 10 \quad [5]$$

Donde:

EUA = Eficiencia del uso del agua.

ΔV = Incremento en volumen del rodal (m³/ha).

EVTn = Evapotranspiración neta (m³/ha).

Mientras que la tasa de transpiración queda determinada por la siguiente relación:

$$Tt = EVTn * 10 / \Delta V \quad [6]$$

Donde:

Tt = Tasa de transpiración (m³ agua/m³ madera por hectárea).

ΔV = Incremento en volumen del rodal (m³/ha).

EVTn = Evapotranspiración neta (m³/ha).

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Precipitaciones

Durante el período de estudio comprendido entre el 12 de octubre del 2002 hasta el 23 de septiembre del 2003, se registró un total de 565,7 mm de agua caída en la zona de estudio Cajones y 637,2 mm en la zona de estudio Lircay.

Estas cantidades son un 35,2 y un 11% inferior a las precipitaciones normales para la zona que son 872,8 mm y 716,6 mm para Cajones y Lircay, respectivamente.

Para las dos localidades se evidenció un año con un marcado déficit hídrico especialmente en la temporada húmeda que va desde abril a septiembre.

En las dos zonas de estudio los únicos meses que superaron las precipitaciones normales fueron octubre, enero y marzo.

Las figuras 2 y 3 muestran las diferencias mensuales entre precipitación normal y total para Cajones y Lircay respectivamente.

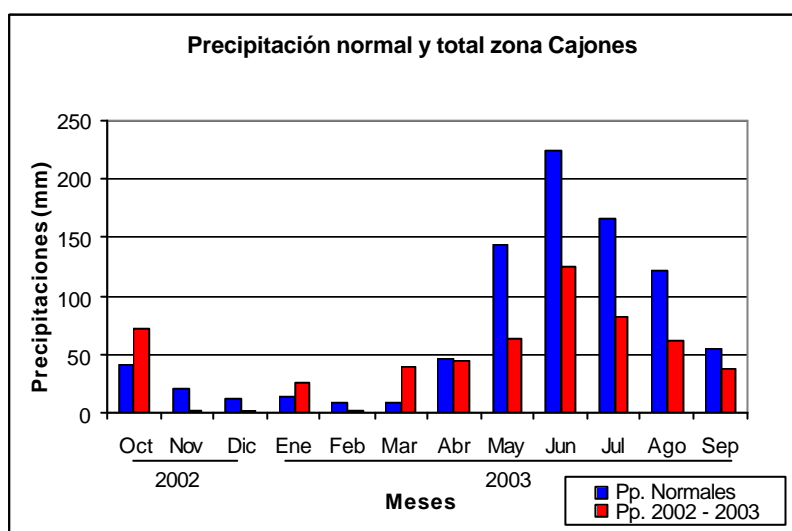


Figura 2. Precipitación normal y total mensual para la zona de estudio Cajones (*P. radiata*).

Cajones presentó la máxima precipitación mensual en junio con 126 mm, sin embargo ésta fue un 44% menor al promedio mensual normal para la zona. El mes mas seco fue diciembre con 2,1 mm.

Un análisis más estacional permite inferir que la temporada seca (octubre a marzo) presentó una precipitación de 147,5 mm, lo que representa un 27% del total. La temporada húmeda (abril a septiembre) presentó una precipitación de 418,2 mm, lo que representa un 74% del total precipitado.

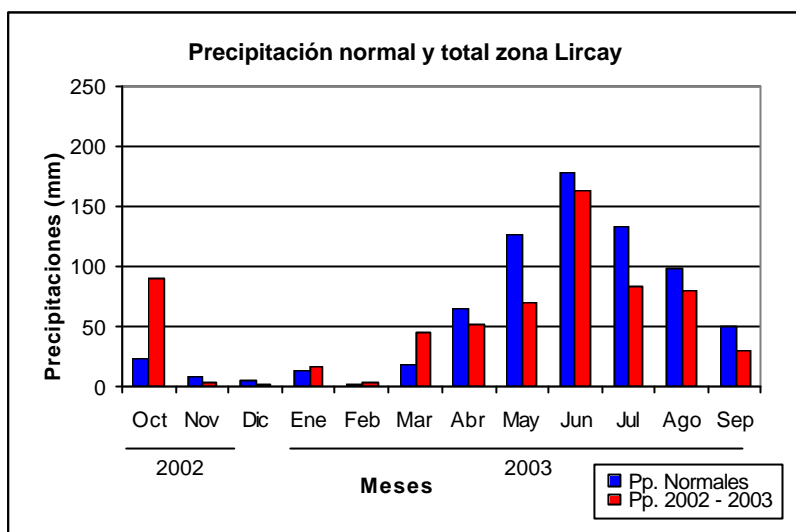


Figura 3. Precipitación normal y total mensual para la zona de estudio Lircay (*E. globulus*).

Lircay presentó la máxima precipitación mensual en junio con 162,8 mm lo que es un 8,1% inferior al promedio mensual normal para la zona. El mes mas seco es diciembre con 2,2 mm.

La temporada seca (octubre a marzo) presentó una precipitación de 162,2 mm, lo que representa un 25,4% del total precipitado. La temporada húmeda (abril a septiembre) presentó una precipitación de 475 mm, lo que representa un 74,5% del total precipitado.

4.2 Redistribución de las precipitaciones

A continuación se presentan los cuadros 2 y 3 con el detalle de la redistribución de las precipitaciones para cada zona de estudio.

Cuadro 2. Componentes de la redistribución de las precipitaciones Cajones (*P.radiata*).

MES	Pp (mm)	Pd		Pf		Pn		Ic	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Oct	72,1	43,1	59,8	2,0	2,8	45,1	62,6	27,0	37,4
Nov	3,9	0,6	15,8	0,1	1,6	0,7	17,4	3,2	82,6
Dic	2,1	0,4	19,6	0,0	1,0	0,4	20,6	1,7	79,4
Ene	26,5	11,4	42,9	0,3	1,2	11,7	44,0	14,8	56,0
Feb	3,3	0,4	12,3	0,1	1,5	0,5	13,9	2,9	86,1
Mar	39,6	19,0	48,0	1,2	3,0	20,2	51,0	19,4	49,0
Abr	44,3	18,6	42,0	1,2	2,6	19,8	44,6	24,5	55,4
May	65,4	35,5	54,3	2,6	3,9	38,1	58,3	27,3	41,7
Jun	126,0	65,4	51,9	4,8	3,8	70,2	55,7	55,8	44,3
Jul	82,5	38,9	47,1	3,3	4,0	42,2	51,1	40,3	48,9
Ago	62,4	39,1	62,7	2,3	3,7	41,4	66,4	20,9	33,6
Sep	37,7	19,1	50,6	1,3	3,4	20,3	54,0	17,3	46,0
Total	565,7	291,4	52	19,1	3,4	310,5	55	255,1	45,1

La precipitación directa en Cajones alcanzó un 52% respecto de la precipitación total incidente, el escurrimiento fustal aporta un 3,4%, por lo que la intercepción de copas llegó al 45,1% del total precipitado en Cajones (plantado con *P. radiata*).

Cuadro 3. Componentes de la redistribución de las precipitaciones en Lircay (*E. globulus*).

MES	Pp (mm)	Pd		Pf		Pn		Ic	
		(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Oct	90,2	56,7	62,9	1,5	1,7	58,3	64,6	32,0	35,4
Nov	3,6	0,7	18,7	0,1	1,9	0,8	20,6	2,9	79,4
Dic	2,2	0,8	33,9	0,0	0,0	0,8	33,9	1,5	66,1
Ene	16,9	6,0	35,7	0,1	0,8	6,2	36,4	10,7	63,6
Feb	4,0	1,3	31,8	0,1	1,3	1,3	33,1	2,7	66,9
Mar	45,3	27,3	60,3	0,6	1,4	27,9	61,7	17,3	38,3
Abr	51,8	30,1	58,1	0,6	1,1	30,7	59,2	21,1	40,8
May	68,6	48,5	70,8	1,5	2,2	50,0	73,0	18,5	27,0
Jun	162,8	136,3	83,7	2,5	1,6	138,8	85,3	24,0	14,7
Jul	83,9	64,5	76,9	1,6	1,9	66,1	78,8	17,8	21,2
Ago	78,7	59,4	75,5	2,1	2,7	61,5	78,2	17,2	21,8
Sep	29,2	18,5	63,4	0,7	2,4	19,3	65,9	10,0	34,1
Total	637,2	450,1	70,6	11,4	1,8	461,6	72,4	175,6	27,6

La precipitación directa en Lircay alcanzó un 70.6% respecto de la precipitación total incidente, el escurrimiento fustal aporta sólo un 1,8%, por lo que la intercepción de copas llegó al 27,6% del total precipitado en Lircay (plantado con *E. globulus*).

La figura 4 compara las diferencias porcentuales entre los componentes de la redistribución entre Cajones y Lircay respectivamente.

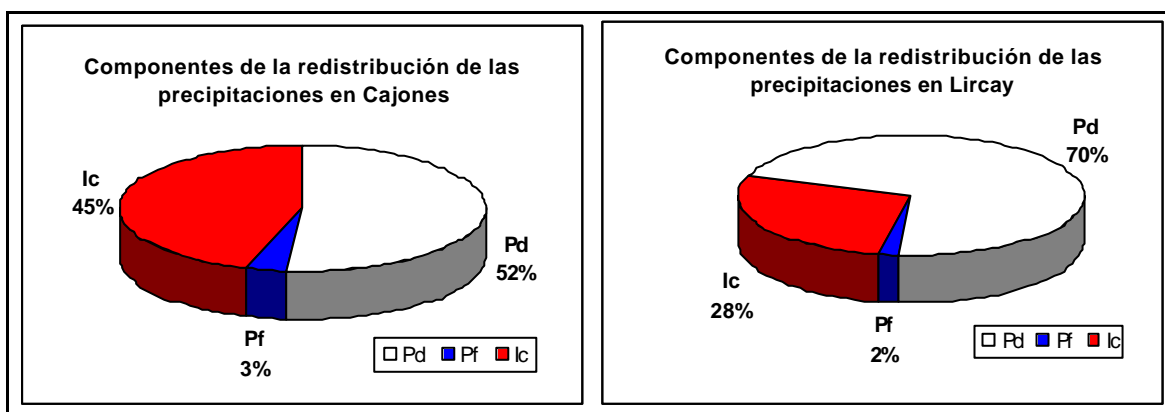


Figura 4. Componentes de la redistribución de las precipitaciones para las zonas de estudio (valores en porcentaje de precipitación total).

Comparando, se observa que en Cajones la intercepción de copas fue mayor que en Lircay, con un 45% de intercepción contra el 28% en Lircay.

Estos valores son superiores a los entregados por Molina (1997) en la zona de Valdivia, el cual registró intercepciones de 2,8% y 3,5% para plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* de 4 y 2 años de edad respectivamente. Estas

diferencias pueden ser principalmente atribuidas a la cantidad, duración e intensidad de las precipitaciones las cuales son muy superiores en la zona de Valdivia por lo que las pérdidas por intercepción se reducen. Además debe tomarse en cuenta que las condiciones climáticas del secano interior favorecen aun más la rápida evaporación del agua acumulada en las copas (especialmente durante la época de estío) por lo que eventos de lluvia cortos y de poca intensidad pueden llegar a ser interceptados por completo.

El escurrimiento fustal en Lircay corresponde a un 1,8% del total precipitado, en Cajones este valor se eleva al 3,4%, en lo cual podría ejercer influencia según Oyarzún *et al*, (1985), la forma de inserción de las ramas en *Pinus radiata* la cual provoca un efecto de “embudo”, especialmente en árboles jóvenes, aumentando de esta manera los aportes por escurrimiento fustal.

Estas características se evidencian en forma más clara al analizar los aportes por escurrimiento fustal en litros por árbol, donde Cajones presenta un aporte de escurrimiento fustal por árbol de 153 litros anuales, mientras que en Lircay tal aporte es de 82 litros anuales por árbol.

Oyarzún y Huber (1999) registraron valores de escurrimiento fustal de 3,5% en *Pinus radiata* y 0,8% en *Eucalyptus globulus*, para plantaciones de 4 años ubicadas en la zona de Valdivia (valores porcentuales respecto de la precipitación total), el mismo estudio registró aportes anuales de agua por árbol de 653 litros para *Pinus radiata* y solamente 67 litros para *Eucalyptus globulus*, atribuyéndole tal diferencia a la verticalidad y convergencia de las ramas al tronco principal.

Estas diferencias podrían ser particularmente importantes durante los meses donde se presenta un mayor déficit hídrico, pensando en que esta agua llega directamente a la zona de raíces donde puede ser mas fácilmente aprovechada, sin embargo para el caso de Cajones y Lircay el aporte de agua por escurrimiento fustal durante el período seco es poco importante.

La precipitación directa en Lircay es mayor, aportando un 70,6% respecto de la precipitación total incidente, este valor sumado al escurrimiento fustal entrega un 72,4% de precipitación neta respecto de la precipitación total medida.

Para el caso de Cajones la precipitación directa representó un 52% del total precipitado, esto sumado al escurrimiento fustal totalizó un 55% de precipitación neta respecto de la precipitación total medida.

De esta forma, las mediciones y el análisis de la redistribución de las precipitaciones establecieron que el rodal de Lircay presentó un aporte de precipitación neta 151 mm mayor que en Cajones, lo que implicaría que Lircay dispuso de una mayor cantidad de agua disponible para la vegetación durante el período de estudio.

4.3 Variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo

En los cuadros 4 y 5 se presenta la variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo (porcentaje en volumen) para las dos zonas de estudio.

Cuadro 4. Variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo en Cajones (valores en porcentaje de volumen).

CAJONES Profundidad (cm)	Fecha de medición											
	16-10	18-11	21-12	19-1	20-2	18-3	22-4	15-5	20-6	18-7	22-8	24 - 9
25	13,6	13,8	13,5	13,5	13,4	13,5	13,5	13,6	15,1	15,4	15,9	13,8
75	13,6	12,5	12,7	12,5	11,9	12,2	11,9	12,3	12,8	13,1	13,6	12,2
125	16,3	13,6	12,0	11,7	11,4	11,2	11,1	11,0	11,4	11,4	12,2	12,1
175	16,7	14,7	12,3	11,7	11,3	11,2	11,0	11,0	11,3	11,3	11,4	11,2
225	15,3	13,9	12,5	11,6	10,7	10,4	10,4	10,4	11,0	11,0	11,3	10,6
275	18,4	17,6	16,4	15,9	15,6	15,4	15,3	15,1	15,6	15,6	15,8	15,1
Humedad perfil (mm)	469,5	430,5	397	384,5	371,5	370	366	367	386	389	401	375
Variación	-75	-39	-33,5	-12,5	-13	-2	-3,5	1	19	3	12	-26
Precipitación total (mm)	72,1	3,9	2,1	26,5	3,3	39,6	44,3	65,4	126,0	82,5	62,4	37,7

Cuadro 5. Variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo en Lircay (valores en porcentaje de volumen).

LIRCAY Profundidad (cm)	Fecha de medición											
	16-10	19-11	20-12	18-1	20-2	19-3	23-4	16-5	21-6	19-7	29-8	25 - 9
25	16,6	14,6	12,4	12,6	12,1	12,3	12,0	12,1	16,9	17,1	18,2	16,1
75	16,1	14,0	11,9	11,2	11,5	11,4	11,2	11,2	16,7	17,7	18,1	16,4
125	19,7	19,6	16,4	16,2	16,2	16,2	15,8	15,8	16,5	17,7	18,8	16,3
175	18,7	17,2	16,8	16,0	15,8	15,8	15,8	15,9	16,4	17,1	18,4	17,1
225	21,1	18,7	17,3	16,5	16,4	16,4	15,9	15,9	16,8	17,3	17,2	17,2
275	20,6	19,1	17,2	17,0	16,2	16,2	16,1	16,0	17,4	17,8	17,8	17,6
Humedad perfil (mm)	564,2	515,8	460,0	447,7	440,6	441,4	434,0	434,5	503,5	523,5	542,5	503,5
Variación	-47,0	-48,4	-55,8	-12,3	-7,1	0,7	-7,4	0,5	69,0	20,0	19,0	-39
Precipitación total (mm)	90,2	3,6	2,2	16,9	4,0	45,3	51,8	68,6	162,8	83,9	78,7	29,2

En cajones la cantidad de agua del perfil osciló entre los 469,5 mm en octubre y 366 mm en abril, en Lircay la cantidad de agua del perfil osciló entre los 564,2 mm en octubre y 434 mm en abril.

Durante el período de estudio las reservas de agua del suelo en Cajones fueron disminuyendo desde octubre hasta mayo producto de la utilización de estas por parte de la vegetación y de los pocos aportes por precipitación neta, a partir de junio las reservas de agua del suelo comienzan a recuperarse debido a los mayores montos de precipitación neta.

Para el caso de Lircay las reservas de agua del suelo fueron siempre mayores que en Cajones, sin embargo siguen la misma tendencia de disminución entre octubre y mayo producto de la utilización de las reservas por parte de la vegetación y los pocos aportes por precipitación neta y recuperación a partir de junio debido a los mayores aportes por precipitación neta.

Para las dos zonas de estudio se registraron valores descendentes en las reservas de agua del suelo entre octubre y mayo, las cuales comenzaron a recuperarse a partir de junio, sin embargo ninguna de las zonas logró el nivel de saturación registrado a principios del estudio lo que se debería principalmente a que el invierno del año 2002 presentó mayores precipitaciones y en menor medida a la mayor utilización de las reservas de agua del suelo por parte de las plantaciones producto del rápido desarrollo de estas.

Oyarzún y Huber (1999), registraron un decrecimiento paulatino de las reservas de agua del suelo, especialmente durante los períodos estivales en plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en la zona de Valdivia, atribuyendo tal efecto al rápido crecimiento de las plantaciones.

El mismo estudio concluye que esta situación sería particularmente importante en regiones con escasas precipitaciones, ya que además del consumo por evapotranspiración hay que considerar las pérdidas por intercepción, las cuales son especialmente importantes en zonas con déficit hídrico.

Comparando la variación del contenido de humedad del suelo entre los rodales, las máximas variaciones son de 103 y 130 mm para Cajones y Lircay respectivamente.

Tomando en cuenta que el sotobosque en Lircay es significativamente más ralo que en Cajones y que el suelo en Lircay presentaría una mayor capacidad de retención de agua, se estaría evidenciando un mayor consumo de agua por parte de los árboles en este rodal.

Sin embargo un sotobosque más ralo podría tener un mayor efecto sobre la evaporación directa desde el suelo, producido por mayores niveles de radiación directa, especialmente durante primavera y verano, lo que para el caso de Lircay estaría compensado por una mayor capacidad de retención de agua del suelo.

Las figuras 5 y 6 muestran la variación temporal y espacial el contenido de humedad del suelo y los aportes por precipitación total y neta para Cajones y Lircay respectivamente.

El agotamiento de las reservas de agua registradas a mayor profundidad en Cajones se debería a la presencia de un horizonte de texturas más gruesas, con un menor contenido de arcillas y con una menor capacidad de retención de agua, el cual estaría ubicado aproximadamente entre los 150 y 250 cm de profundidad.

En el caso de Lircay, donde el suelo parece tener texturas más finas con un mayor contenido de arcillas hacia estratos más profundos y por lo tanto una mayor capacidad de retención de agua, el agotamiento más superficial de las reservas de agua en el suelo se debería fundamentalmente al consumo de los árboles y a los bajos aportes por precipitación neta. Se observa que a partir de mayo las reservas comienzan a recuperarse producto de los mayores aportes por precipitación neta.

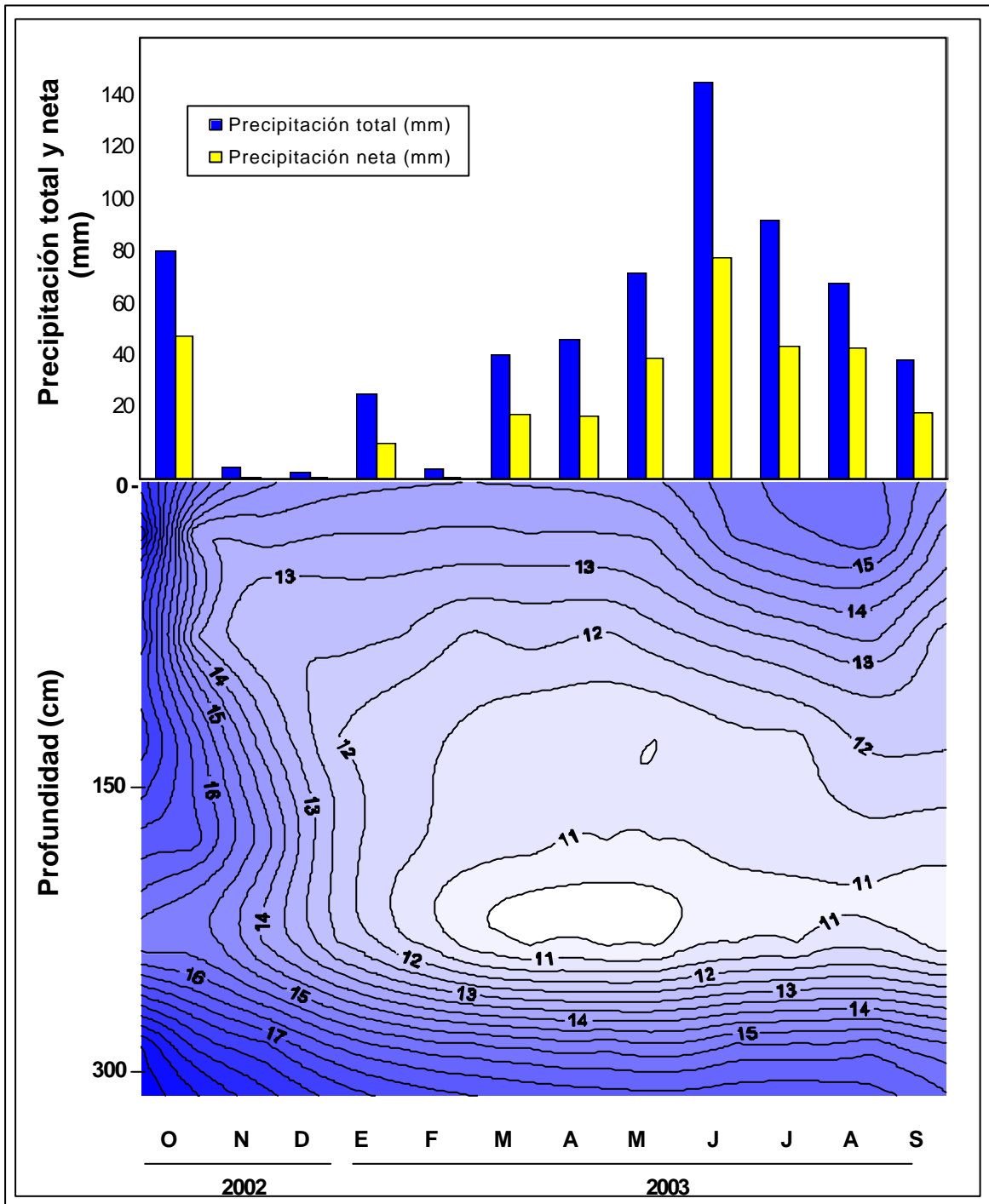


Figura 5. Aportes de agua por precipitación (mm) y variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo (porcentaje en volumen) para Cajones.

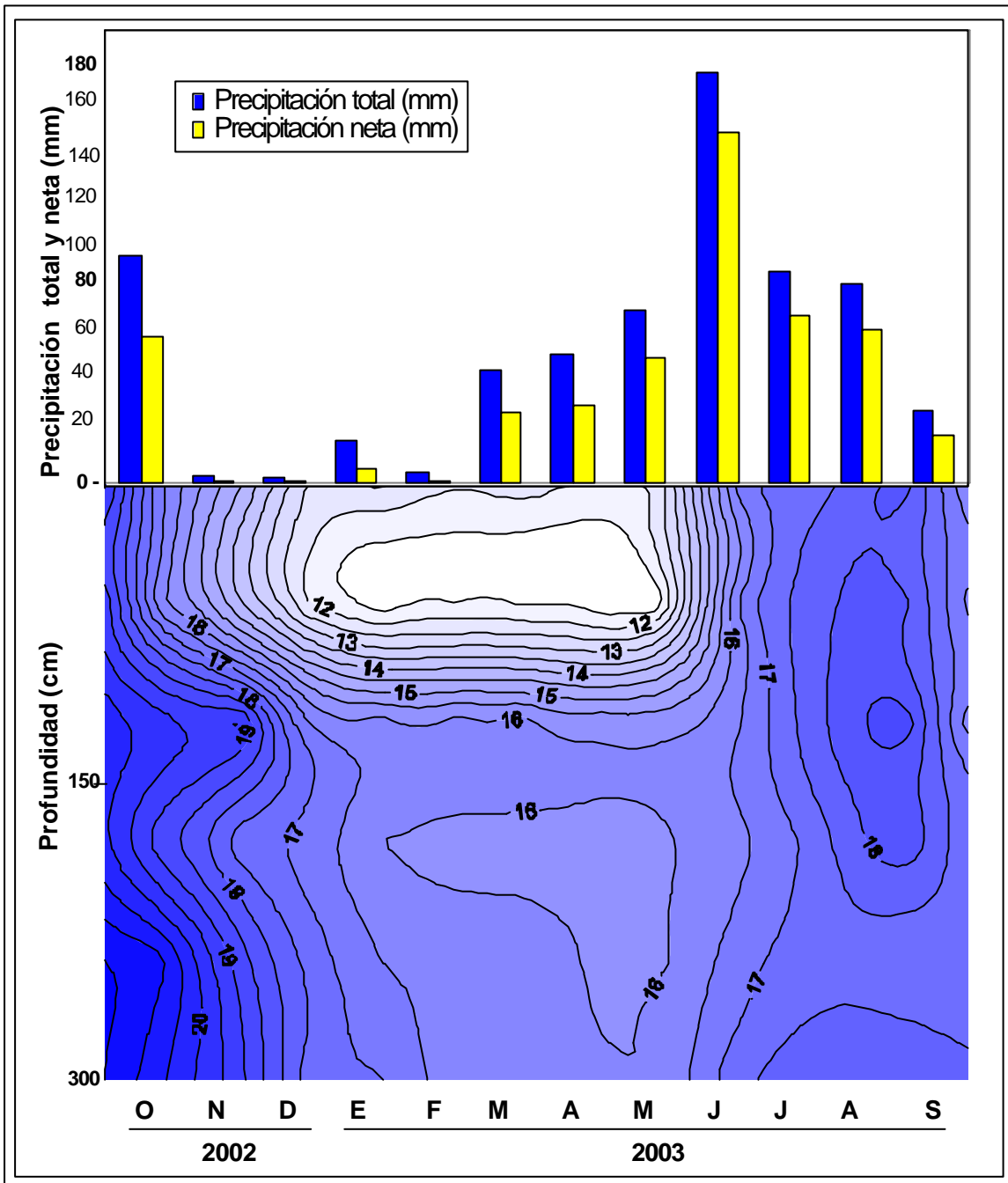


Figura 6. Aportes de agua por precipitación (mm) y variación temporal y espacial del contenido de humedad del suelo (porcentaje en volumen) para Lircay.

4.4 Consumo de agua por evapotranspiración neta

La evapotranspiración neta mensual y anual registrada en los rodales estudiados se presentan en el cuadro 6.

Cuadro 6. Evapotranspiración neta mensual y total (mm) para el período de estudio

	Evapotranspiración neta mensual (mm)											Total (mm)	
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago		Sep
Cajones	120,1	39,7	33,9	24,2	13,5	22,2	23,2	37,1	51,2	27,7	29,4	46,3	468,5
Lircay	105,2	49,1	56,6	18,5	8,4	27,2	38,0	49,4	69,9	33,9	42,5	58,3	556,9

A nivel anual la evapotranspiración neta en Cajones fue de 468 mm, esto representa un 16% menos que la evapotranspiración neta en Lircay con 556 mm.

La evapotranspiración neta a nivel mensual fue mayor en Lircay excepto en los meses de octubre, enero y febrero.

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los montos mensuales de evapotranspiración neta entre Cajones y Lircay para $p < 0,05$ (Anexo 3).

Oyarzún y Huber (1999), registraron valores anuales de evapotranspiración en una plantación de *Pinus radiata* y una de *Eucalyptus globulus* de 4 años en la zona de Valdivia de 639 y 910 mm respectivamente.

Jara (1999), registró valores anuales de evapotranspiración neta en la zona de Collipulli de 504 y 458 mm para dos rodales de *Pinus radiata* de 8 años y distinta densidad (833 y 395 árboles por hectárea respectivamente).

Las diferencias con los estudios antes citados, estarían dadas principalmente por la menor disponibilidad de agua que se produce en Cajones y Lircay, especialmente durante los meses de verano donde las reservas de agua del suelo se encuentran agotadas.

La menor cantidad, duración e intensidad de las precipitaciones registradas en la zona de estudio en comparación con estudios realizados más al sur, se traduce en altos porcentajes de intercepción, lo cual trae como consecuencia una menor disponibilidad de agua en el suelo, lo que a su vez disminuye la evapotranspiración neta.

En Cajones y Lircay los menores montos de evapotranspiración neta se producen en el mes de febrero, lo que estaría dado por la disminución de las reservas de agua en el suelo producto de la poca precipitación neta durante los meses de noviembre, diciembre y enero.

Observando la figura 7, se aprecia que el comportamiento temporal que sigue la evapotranspiración neta en Cajones y Lircay es similar.

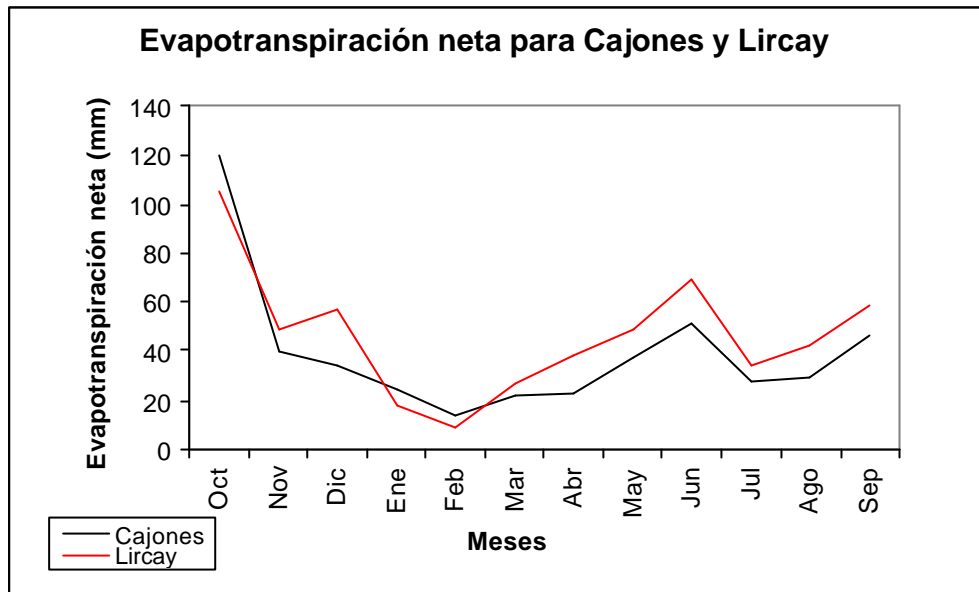


Figura 7. Evapotranspiración neta mensual para Cajones y Lircay (mm).

La figura 8 presenta la evapotranspiración neta mensual para Cajones y Lircay por separado, incluyendo para ambos casos los aportes de agua por precipitación neta.

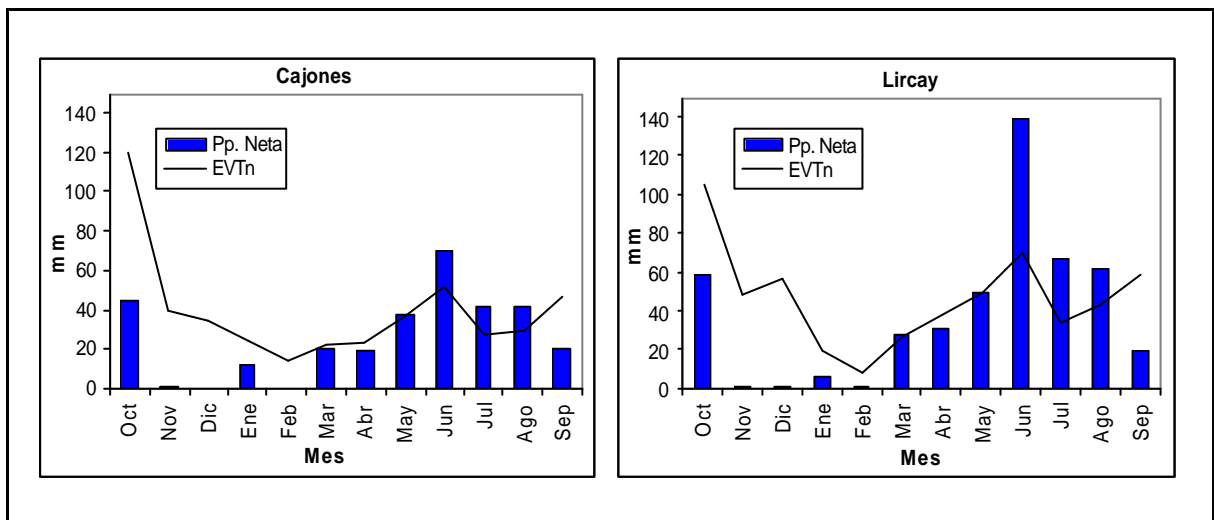


Figura 8. Precipitación neta y evapotranspiración neta para Cajones y Lircay (mm).

Se observa que para Cajones y Lircay, los valores mínimos de evapotranspiración neta se registraron durante los meses de verano.

Tales meses se consideran como los mas apropiados desde el punto de vista climático para producir el fenómeno de evapotranspiración, ya que durante estos meses aumenta la temperatura y disminuye la humedad relativa del aire lo que favorece las condiciones para que se produzca la evapotranspiración (Vásquez; 1983, Oñate; 1984), sin embargo en este caso el factor limitante fue la cantidad de

agua aprovechable en el suelo, la cual durante el verano se encuentra agotada para Cajones y Lircay lo que limita la evapotranspiración a tal punto que es durante los meses de verano donde se producen los mínimos de evapotranspiración neta para los dos rodales.

La evapotranspiración neta en Cajones y Lircay tuvo en su curso anual dos mínimos, uno en verano producto del agotamiento de las reservas de agua aprovechable en el suelo, y otro en invierno debido a la menor capacidad de la atmósfera para retener vapor de agua.

4.5 Incremento en volumen

El incremento en volumen a nivel mensual de los rodales en estudio, se presenta en el cuadro 7.

Cuadro 7. Incremento volumétrico mensual e ICA para los rodales en estudio

		Incremento volumetrico mensual (m ³ /ha)	
		Cajones	Lircay
2002	Oct	0.8	2.4
	Nov	0.5	1.6
	Dic	0.4	1.2
2003	Ene	0.4	1.5
	Feb	0.5	0.3
	Mar	1.0	1.2
	Abr	1.1	2.1
	May	1.3	0.7
	Jun	0.7	0.3
	Jul	0.3	0.5
	Ago	1.0	2.2
	Sep	1.9	1.8
	ICA		9.8

El mayor incremento corriente anual (ICA) en volumen por hectárea para el año de estudio lo presentó el rodal de *Eucalyptus globulus* (Lircay) con 15,7 m³/ha, mientras que el rodal de *Pinus radiata* (Cajones) presenta un incremento corriente anual de 9,8 m³/ha.

En Cajones el mayor incremento volumétrico se produjo en el mes de septiembre con 1,9 m³/ha, mientras que el menor incremento se produjo el mes de julio con 0,3 m³/ha.

Lircay presentó el mayor incremento volumétrico durante el mes de octubre con 2,4 m³/ha, mientras que los menores incrementos se produjeron en el mes de febrero y junio con 0,3 m³/ha.

Los mayores incrementos en volumen se produjeron en septiembre y octubre para Cajones y Lircay respectivamente. Esto se debe a que las reservas de agua en el suelo aun no se encontraban agotadas y a que durante estos meses la actividad fisiológica de los rodales se incrementó, producto de la mejoría en las condiciones climáticas.

Los menores incrementos registrados para los rodales durante los meses de junio y julio se debieron principalmente a la disminución de la actividad fisiológica de los árboles debido a condiciones climáticas desfavorables.

Huber y García (1999), encuentran una relación directa entre el consumo de agua transpirada con la temperatura del aire y la radiación solar.

Keeland y Sharitz (1995), encuentran una alta correlación entre la transpiración y el incremento en volumen.

Por otra parte, el bajo incremento volumétrico registrado en el mes de febrero en Lircay y que para el caso de Cajones también fue bajo sin embargo no es el menor, se deben principalmente al agotamiento de las reservas de agua en el suelo.

Con respecto a *Pinus radiata* estos incrementos fueron menores a los entregados por Jara (1999), el cual registró 23,9 y 15,5 m³/ha de incremento corriente anual en dos plantaciones de *Pinus radiata* de 8 años de edad, ubicadas en la zona de Collipulli en la IX Región. Estas diferencias estarían explicadas por la mayor capacidad de retención de agua del suelo rojo arcilloso y las mayores precipitaciones registradas en esta zona.

En cuanto al incremento corriente anual en volumen por árbol se mantuvo la tendencia registrada en los volúmenes por hectárea, siendo este mayor en Lircay el cual registró 0,0112 m³/árbol de incremento corriente anual en comparación con los 0,0078 m³/árbol registrados en Cajones.

Estos incrementos son menores a los registrados por Brellenthin (2000) y Jara (1999), los cuales registraron incrementos de 0,024 y 0,029 m³/árbol para un rodal de *Eucalyptus globulus* y uno de *Pinus radiata* ambos de 8 años de edad en la zona de Valdivia y Collipulli respectivamente.

Estas diferencias se atribuyen principalmente a la mayor disponibilidad de agua en el suelo que presentan los rodales de los estudios antes citados, especialmente durante la época de estío producto de las mayores precipitaciones y la mayor capacidad de retención de agua de los suelos en estas zonas, lo que permite extender las tasas de crecimiento durante un mayor tiempo en comparación con la zona del secano interior.

Existen diferencias estadísticamente significativas para el incremento corriente anual en volumen entre los dos rodales (Anexo 4), las cuales se debería a una mayor cantidad de agua disponible en el suelo para los árboles en Lircay, producto de una

mayor precipitación incidente, una menor pérdida de agua intercepción de copas y una menor participación del sotobosque en la evapotranspiración neta.

En la figura 9 se observa que los incrementos mensuales en volumen son mayores en el rodal de *Eucalyptus globulus* (Lircay), a excepción de los meses de febrero, mayo y junio.

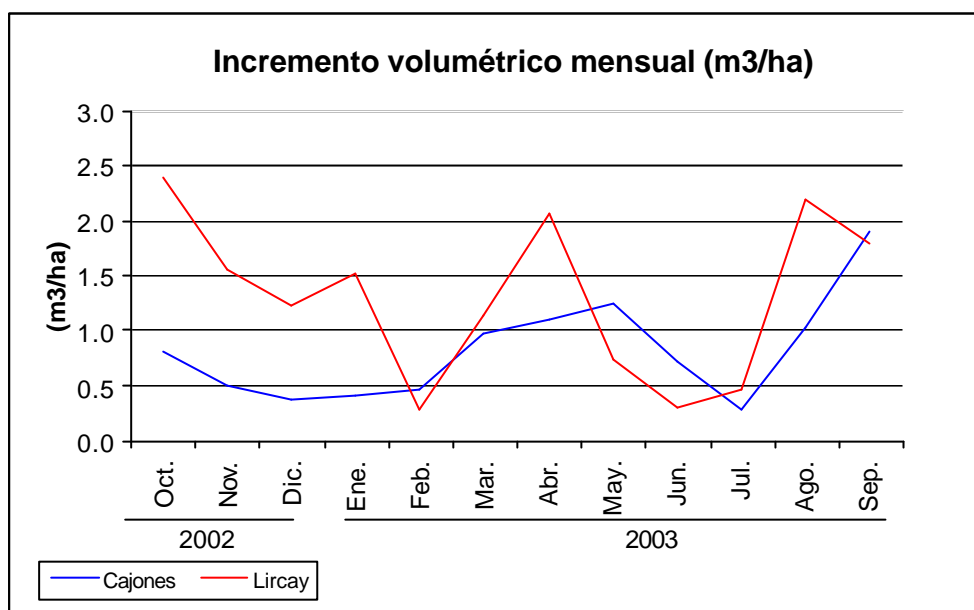


Figura 9. Incremento volumétrico mensual (m³/ha) para las dos zonas de estudio.

4.6 Relación entre el consumo de agua por evapotranspiración neta y el incremento volumétrico.

Para determinar que grado de relación existe entre la evapotranspiración neta y el incremento volumétrico, se ajustaron modelos matemáticos por medio del software estadístico Curve expert 1.3 (Anexo 5).

En Cajones y Lircay, los modelos presentaron coeficientes de determinación de 0,27 y 0,42 con un nivel de significancia de $p < 0,01$ respectivamente, lo cual es bajo en comparación con correlaciones establecidas en otros estudios.

Las figuras 10 y 11 muestran las curvas ajustadas para cada modelo que relaciona la evapotranspiración neta (mm) y el incremento mensual en volumen (m³/ha).

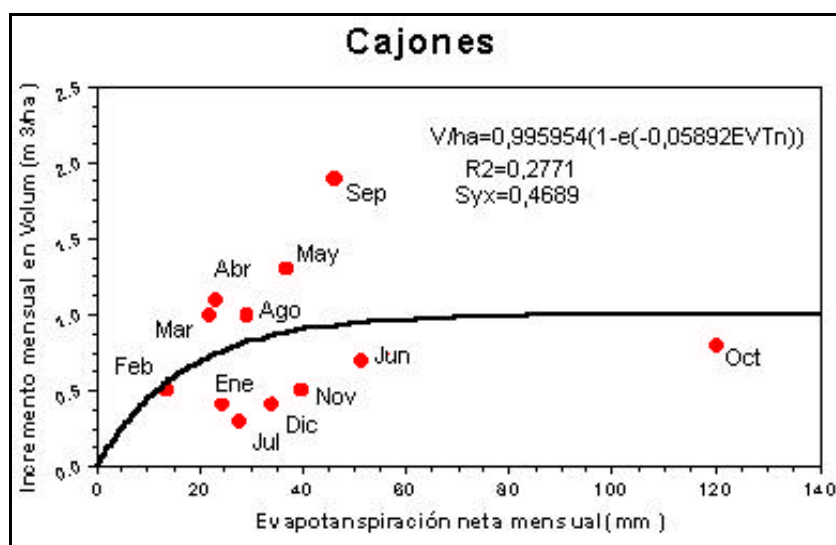


Figura 10. Modelo que relaciona evapotranspiración neta (mm) e incremento volumétrico (m³/ha) en Cajones.

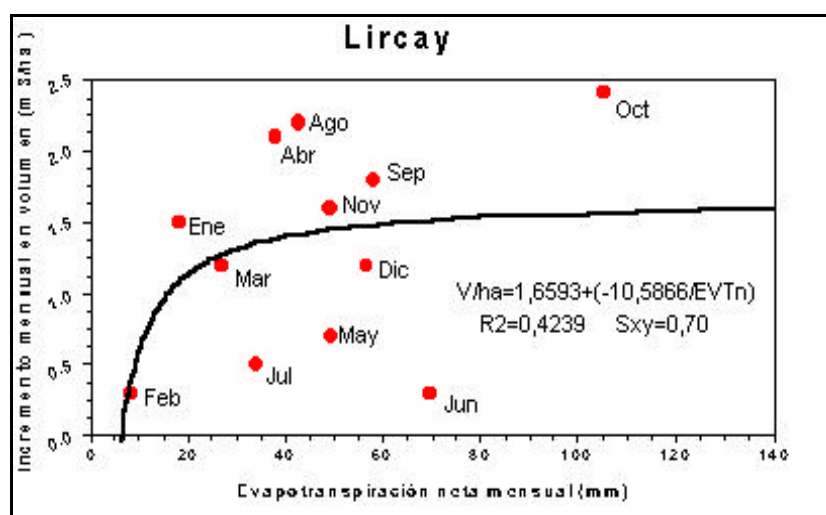


Figura 11. Modelo que relaciona evapotranspiración neta (mm) e incremento volumétrico (m³/ha) en Lircay.

Las diferencias de correlación entre los montos de evapotranspiración neta mensual (mm) y el incremento mensual en volumen (m³/ha) en Cajones y Lircay se deberían principalmente a que la evapotranspiración neta incluye la evaporación del suelo, hojarasca y la transpiración de la vegetación herbácea, la cual tiene una distinta ponderación a nivel anual y una distinta participación en los rodales.

Los bajos coeficientes de determinación para Cajones y Lircay pueden explicarse citando a Sands y Mulligan (1990), quienes indican que durante períodos de escasez de agua se produce un aumento del déficit de presión de vapor, lo que trae como consecuencia un cierre estomático por parte de los árboles, lo que reduce la

transpiración mas que la fotosíntesis, produciéndose una disminución mas importante en la evapotranspiración que en el incremento en volumen.

Jara (1999), registró coeficientes de determinación de 0,85 y 0,88 en dos rodales de *Pinus radiata* de 8 años en la zona de Collipulli, IX Región.

Brellenthin (2000), registró un coeficiente de determinación de 0,77 para un rodal de *Eucalyptus globulus* de 8 años en la zona de Valdivia, X Región.

4.7 Eficiencia del uso de agua (EUA)

El cuociente entre el incremento corriente anual en volumen (m^3/ha) y la evapotranspiración neta mensual determina la eficiencia del uso de agua en las dos zonas de estudio.

El cuadro 8 muestra los valores de eficiencia del uso de agua y tasa de transpiración para Cajones y Lircay.

Cuadro 8: Eficiencia del uso de agua (EUA) y Tasa de transpiración (m^3 agua/ m^3 madera/ha).

	EUA	Tasa transpiración
Cajones	0,00209	478,4
Lircay	0,00281	354,6

Se observa que la zona Lircay plantada con *Eucalyptus globulus* presenta la mayor v eficiencia de uso de agua. Esto implica que se emplea una menor cantidad de agua evapotranspirada por m^3/ha de incremento volumétrico en comparación con Cajones plantado con *Pinus radiata*.

En efecto la tasa de transpiración (valor recíproco de la EUA), indica que para Lircay se requieren 354,6 m^3 de agua para producir $1m^3/ha$ de madera en comparación con los 478,5 m^3 necesarios en Cajones.

Brellenthin (2000), registró una tasa de transpiración de 238,2 m^3 de agua para producir $1m^3/ha$ de madera en un rodal de *Eucalyptus globulus* de 10 años en la zona de Valdivia, esto implica una menor cantidad de agua evapotranspirada por m^3/ha de madera producida en comparación con Lircay.

Con respecto a *Pinus radiata* los valores de tasa de transpiración son mayores a los entregados por Jara (1999), el cual registró 211,2 y 296 m^3 de agua necesaria para producir 1 m^3 de madera en dos rodales de *Pinus radiata* de 8 años y densidades de 833 y 395 árboles por hectárea respectivamente en la zona de Collipulli IX Región.

La principal diferencia en estos resultados se debe a que hacia regiones mas septentrionales de Chile los incrementos volumétricos son sustancialmente mayores

debido a una mayor cantidad de agua disponible en el suelo, especialmente durante la época de estío, lo que extiende el período de crecimiento de los árboles.

En general, el presente estudio confirmó las tendencias registradas por distintos estudios realizados en diferentes zonas de Chile (Jara, 1999; Lira, 1999; Brellenthin, 2000; García, 2000), en cuanto a que *Eucalyptus sp.* presentó una mayor eficiencia del uso de agua que *Pinus radiata*.

La presencia de una cubierta herbácea es un factor que influye significativamente en la eficiencia del uso de agua de las plantaciones, esto se debe a que las herbáceas participan en forma importante en los montos de evapotranspiración neta disminuyendo de esta forma la EUA.

Esto parece haber sucedido en el rodal de *Pinus radiata* en Cajones, el cual registró una menor EUA debido a un menor incremento volumétrico provocado por los menores aportes por precipitación neta, la menor capacidad de retención de agua del suelo y la mayor participación de la cubierta herbácea en la evapotranspiración neta, lo que disminuye el aprovechamiento del agua útil del suelo por parte de los árboles.

La mayor eficiencia del uso de agua registrada en el rodal de *Eucalyptus globulus* en Lircay, está explicada por el mayor incremento volumétrico registrado en este rodal, el cual está determinado por mayores aportes por precipitación neta, una mayor capacidad de retención de agua en el suelo y una evapotranspiración neta atribuida principalmente a los árboles debido a la baja participación del sotobosque.

De esta forma, tomando en cuenta la importante influencia que ejerce la cubierta herbácea en la eficiencia de uso de agua por parte de las plantaciones, el control de malezas surge como una práctica silvícola importante para el aumento de la eficiencia del uso de agua, especialmente en zonas donde el déficit hídrico se presenta como la limitante principal para el desarrollo de la vegetación como es el caso de el secano interior de Chile.

5. CONCLUSIONES

- La cantidad de agua involucrada en las pérdidas por intercepción fueron de 45,1 y 27,6% respecto de la precipitación total incidente para los rodales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* respectivamente. Estos porcentajes de intercepción son significativamente mayores a los registrados por otros estudios ubicados mas al sur de Chile, lo cual se explica por las condiciones climáticas las cuales son mas favorables para la evaporación y la cantidad, duración e intensidad de las precipitaciones las cuales son menores en la zona del secano interior. El aporte por escurrimiento fustal es porco importante para los dos rodales en estudio, especialmente durante el período seco.
- Producto de la mayor precipitación incidente en Lircay y de la menor intercepción de copas en *Eucalyptus globulus*, la precipitación neta fue mayor en este rodal, lo que condiciona una mayor disponibilidad de agua en el suelo por parte de la vegetación.
- La evapotranspiración neta anual fue mayor en Lircay (*Eucalyptus globulus*), lo que estaría dado por la mayor disponibilidad de agua en el suelo que presenta este rodal en comparación con Cajones (plantado con *Pinus radiata*).
- Los incrementos volumétricos registrados para Cajones y Lircay, fueron inferiores a los registrados por otros estudios en regiones mas septentrionales de Chile. Esto está determinado principalmente por las condiciones climáticas del secano interior, donde el déficit hídrico se presenta como la limitante principal en el desarrollo de la vegetación.
- Las diferencias estadísticamente significativas para el incremento corriente anual en volumen favorables para Lircay, se deberían a una mayor cantidad de agua disponible en el suelo para los árboles en este rodal, producto de una mayor precipitación incidente, una menor pérdida de agua intercepción de copas y una menor participación del sotobosque en la evapotranspiración neta.
- Los modelos ajustados para relacionar la evapotranspiración neta mensual con los incrementos volumétricos mensuales presentaron un bajo coeficiente de determinación para Cajones y Lircay siendo de 0,27 y 0,42 respectivamente ($p < 0,01$). Esto se debería fundamentalmente a que la evapotranspiración neta incluye la evaporación desde el suelo y hojarasca, y la transpiración de la cubierta herbácea, la cual a su vez tiene una distinta ponderación entre los rodales en estudio y una distinta participación durante el año.
- Los valores registrados de eficiencia de uso de agua son 0,00209 y 0,00281 para Cajones y Lircay respectivamente. En términos de tasa de transpiración los valores registrados son 478 y 354 m³ de agua necesarios para producir 1m³ de madera por hectárea para Cajones y Lircay respectivamente.

- Los valores de eficiencia de uso de agua para las dos especies en estudio se presentan como uno de los menores registrados en Chile, esto se debe fundamentalmente a los bajos incrementos volumétricos de las plantaciones producto de la baja cantidad de agua disponible en el suelo especialmente durante los meses de verano donde los incrementos en volumen disminuyen significativamente.
- La eficiencia del uso de agua es mayor en el rodal de *Eucalyptus globulus*, lo que está determinado por el mayor incremento volumétrico de esta especie en comparación con *Pinus radiata* en Cajones.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Brady, N.; Weil, R. 1999. The nature and properties of soils. New Jersey, USA. Simon & Schuster. 881 p.
- Brellenthin, R. 2000. Variación temporal de la relación entre el crecimiento y consumo de agua de un rodal joven de *Eucalyptus globulus* en la zona de Valdivia, X Región de Chile. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 109 p.
- Crockford, R.; Richardson, D. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. Hydrological Processes 14: 2903 – 2920
- Donoso, C. 1994. Ecología Forestal; El Bosque y su Medio Ambiente. 4ª ed. Santiago, Universitaria. 369 p.
- Dunin, F.; Mackay, S. 1982. Evaporation of eucalypt and coniferous forest communities. In: The First National Symposium on Forest Hydrology. O'Loughlin, E.; Bren, J.(eds.). Institution of engineers of Australia, Canberra. 18 - 25
- Dunkerley, D. 2000. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. Hydrological Processes 14, 669 – 678
- Eastham, J.; Rose, C.; Charles-Edwards, D; Cameron, D.; Rance, S. 1990. Planting density effects on water use efficiency of trees and pasture in an agroforestry experiment. New Zeland Journal of Forestry Science. 20 (1): 39 – 53
- Fernández, F. 1996. Manual de Climatología Aplicada: clima, medio ambiente y planificación. Síntesis. Madrid, España. 285 p.
- Fischer, R. 1980. Influence of water stress on crop yield in semi-arid regions. In: Adaptation of plants to water and high temperature stress. Turner, N.; Kramer, P.(eds.). John Wiley and Sons, New York: 323 – 329
- Fuenzalida, H. 1974. Climatología de Chile. Santiago, Departamento de geofísica y geografía. Universidad de Chile. 72 p.
- García, N. 2000. Eficiencia en el uso del agua en un rodal joven de *Pinus radiata* (D.Don) en la zona de Valdivia, X Región, Chile. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Cs. Forestales. 64 p.
- Huber, A.; García, F. 1999. Importancia de los factores meteorológicos en la transpiración potencial de *Pinus radiata*. Phytón 65: 143 - 152

- Huber, A.; Oyarzún, C. 1984. Factores reguladores de la intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. Don). *Bosque* 5 (2): 59 – 64
- Huber, A.; Oyarzún, C.; Ellies, A. 1985. Balance Hídrico entre plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque* 6 (2): 74 – 82
- Huber, A.; Trecaman, R. 2002. Efecto de variabilidad de las precipitaciones sobre el desarrollo de plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona de los arenales VII Región, Chile. *Bosque* 23 (2): 43 – 49
- Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN), 1964. Suelos: Descripciones proyecto aerofotogramétrico Chile/O.E.A/B.I.D. Corporación de Fomento a la Producción. Publicación 2. 391 p.
- Jara, J. 1999. Influencia de las características de un rodal de *Pinus radiata* sobre la eficiencia del uso de agua, en la zona de Collipulli IX Región. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 84 p.
- Keeland, B.; Sharitz, R. (1995). Seasonal growth patterns of *Niza sylvatica* var. *Biflora*, *Nissa aquatica*, and *Taxodium distichum* as affected by hydrologic regime. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1084 – 1096
- Kramer, P. 1974. Relaciones hídricas del suelo y plantas. Una síntesis moderna. Agencia para el desarrollo internacional (A.I.D.). México. 538 p.
- Lira, I. 1999. Consecuencias del manejo de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane et Maiden) Maiden. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Cs. Forestales. 69 p.
- López, C.; Blanco, C. 1978. Hidrología Forestal. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, v.1, 387 p.
- Martínez De Azagra, A.; Navarro, J. 1996. Hidrología forestal. El ciclo hidrológico. Angelma S.A. España. 286 p.
- Ministerio de Obras Públicas. 1987. Balance hídrico de Chile. Dirección General de Aguas, Santiago (Chile). 87 p.
- Molina, C. 1997. Influencia de una plantación joven de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en la redistribución de las precipitaciones y humedad del suelo. Tesis Prof. Hist., Geogr. y Educ. Cív. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Filosofía y Humanidades. 84 p.
- Novoa, P. 1998. Estimación de la evaporación actual en bosques: Teoría. *Bosque* 19 (1): 111 – 121

- Oñate, C. 1984. Influencia de algunos factores meteorológicos en el consumo de agua por transpiración de algunas especies arbóreas del sur de Chile. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Cs. Forestales. 84 p.
- Oyarzún, C.; Huber, A.; Vásquez, S. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata*. I: Redistribución de las precipitaciones. *Bosque* 6(1): 3 – 14
- Oyarzún, C.; Huber, A. 1999. Balance hídrico en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. *Terra* 17(1): 35 – 44
- Peters, R. 2001. Eficiencia en el uso del agua en plantaciones jóvenes de *Pinus radiata*, en suelos de arenas (VIII Región), y Rojo Arcilloso (IX Región). Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 93 p
- Putuhena, W.; Cordery, I. 2000. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 59-72
- Robinson, D.; Wagner, R.; Bell, F.; Swanton, C. 2001. Photosynthesis, nitrogen use efficiency, and water-use efficiency of jack pine seedlings in competition with four boreal forest plant species. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 2014 –2025
- Sands, R.; Kriedemann, R.; Cotterill, P. 1984. Water relations and photosynthesis in three families of radiata pine seedlings known to differ in their response to weed control. *Forest Ecology and Management* 9: 173 – 184
- Sands, R.; Mulligan, D. 1990. Water and nutrient dynamics and tree growth. *Forest Ecology and Management* 30:91-111
- Vásquez, S. 1983. Características del ciclo hidrológico en plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) con distinto manejo. Tesis. Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Fac. de Cs. Forestales. 114 p.
- Wickramasighe, A. 1988. Modeling tree growth potential based on effective evapotranspiration. *Forest Science* 34(4): 864-881
- Wuenscher, J.; Kozlowski, T. 1971. Relationship of gas-exchange resistance to tree seedling ecology. *Ecology* 52: 1016 – 1023

ANEXOS

ANEXO 1
Abstract

Comparison of water-use efficiency between *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations in dry-land, VII region, Chile.

Water-use efficiency was determined and compared among *Pinus radiata* (8 year old, with density of 1250 stems/ha) and *Eucalyptus globulus* (9 year old, with density of 1400 stems/ha) stands, located in the VII region, corresponding to dry-land zone in Chile.

Incident precipitation, the redistribution of precipitation, evapotranspiration rate and volume increases of plantations were measured to this purpose, during 12 month period from October 2002 to September 2003.

Measurement results determined that *E. globulus* plantation have a mayor contribution in net rainfall, this is product of a mayor incident precipitation and smaller interception losses (27,6% versus 45% in *P.radiata* stand). That situation allow a mayor amount of water available in soil for *E. Globulus* stand.

Moreover, *E. globulus* stand registered a mayor net evapotranspiration and also mayor volume increases compared with *P. radiata* stand.

The efficiency water-use values calculated were 0,00209 to *P. radiata* and 0,00281 to *E. globulus*, it means that *E. globulus* plantation makes use of lower levels of evapotranspirated water (mm) by m³/ha in volume increase compared with *P. radiata*.

In transpiration rate terms, it requires 354,6 m³ and 478,5 m³ of water in *E. Globulus* and *P. Radiata* respectively to produce 1 m³/ha of wood.

Finally, important is to emphasize that this kind of studies development are important tools on decisions taking, specially in areas where water deficiency decreases vegetation growth, in this case dry land of VII region in Chile.

Keywords: Water-use efficiency; net evapotranspiration; volume increase; *Pinus radiata*; *Eucalyptus globulus*.

ANEXO 2
**Análisis de normalidad y prueba Mann–Whitney para las precipitaciones en
Cajones Y Lircay.**

1. Análisis de la distribución de los datos de precipitaciones.

Para determinar si los datos de precipitaciones se distribuyen de forma normal se realizó la prueba Shapiro-Wilks, la cual se basa en la comparación de los quintiles de la curva de distribución normal con los quintiles de los datos.

Se considera que los datos se distribuyen en forma normal bajo esta prueba cuando el valor de $P > 0,1$, considerando un 90% de confianza.

El cuadro 1 muestra el resultado de la prueba realizada para los datos de precipitaciones en Cajones y Lircay.

Cuadro 1. Resultados de la prueba Shapiro-Wilks para determinar normalidad de los datos.

	Shapiro - Wilks	P	Distribución
Cajones	0.743545	3.12E-12	No normal
Lircay	0.763896	1.40E-11	No normal

De esta forma se determinó por medio del software estadístico STATGRAPHICS plus 5.1 que la distribución de los datos de precipitaciones para Cajones y Lircay no es normal sino que siguen una distribución gama por lo que para establecer si existen diferencias significativas entre estos es necesario realizar una prueba del tipo no paramétrica.

2. Prueba Mann–Whitney (Wilcoxon) o prueba W.

El análisis no paramétrico consiste en la prueba Mann–Whitney (Wilcoxon) o prueba W, la cual compara las medianas de los datos a establecer diferencias.

Cuando el valor de P arrojado por la prueba para la hipótesis alternativa es mayor o igual a 0.05, se asume que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas con un nivel de confianza de 95%.

El cuadro 2 entrega los resultados de la prueba realizada para determinar si existen diferencias significativas entre los datos de precipitaciones de Cajones y Lircay.

Cuadro 2. Resultados de la prueba W entre precipitaciones.

Hipótesis nula	Hipótesis Alternativa	W	P
Ho: Cajones = Lircay	H1: Cajones \neq Lircay	1572	0.8526

Dado que el valor de P para la hipótesis alternativa es mayor que 0.05, se asume con un 95% de confianza que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las precipitaciones registradas en Cajones y Lircay.

El mismo análisis se efectuó para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre Cajones y Lircay respecto de la intercepción de copas, los resultados permiten asumir que no existen diferencias significativas.

ANEXO 3
Análisis de normalidad y prueba Mann–Whitney para el consumo de agua por evapotranspiración neta en Cajones y Lircay.

1. Análisis de normalidad para el consumo de agua por evapotranspiración neta mensual en Cajones y Lircay.

Para determinar si el consumo de agua por evapotranspiración neta mensual sigue un curso de distribución normal, se realizó la prueba Shapiro-Wilks.

El cuadro 1 entrega los resultados de la prueba de normalidad para la evapotranspiración neta en Cajones y Lircay.

Cuadro 1. Resultado de la prueba de normalidad para la evapotranspiración neta mensual.

	Shapiro-Wilks	P	Distribución
Cajones	0.696633	4.65E-04	No normal
Lircay	0.949946	5.90E-01	Normal

Dado que Cajones presenta una distribución de la evapotranspiración neta no normal se efectuará la prueba no paramétrica W para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en la evapotranspiración neta mensual entre Cajones y Lircay.

2. Prueba Mann–Whitney (Wilcoxon) o prueba W

El cuadro 2 entrega los resultados de la prueba W efectuada para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en la evapotranspiración neta mensual entre Cajones y Lircay.

Cuadro 2. Resultados de la prueba W para la evapotranspiración neta mensual.

Hipótesis nula	Hipótesis Alternativa	W	P
Ho: Cajones = Lircay	H1: Cajones \neq Lircay	92.5	0.24811

Dado que el valor de P es mayor a 0.05, se asume con un 95% de nivel de confianza que no existen diferencias estadísticamente significativas en la evapotranspiración neta mensual entre Cajones y Lircay.

ANEXO 4
**Análisis de normalidad y prueba t para el incremento corriente anual en
volumen en Cajones y Lircay.**

1. Análisis de normalidad para el incremento en volumen por hectárea en Cajones y Lircay

Para determinar si los incrementos volumétricos mensuales en Cajones y Lircay siguen una distribución normal se realizó la prueba Shapiro-Wilks.

El cuadro 1 muestra los resultados de la prueba de normalidad para el incremento en volumen mensual en Cajones y Lircay.

Cuadro 1. Resultados de las pruebas de normalidad para el incremento en volumen mensual en Cajones y Lircay.

	Shapiro-Wilks	P	Distribución
Cajones	0.904854	1.75E-01	Normal
Lircay	0.937968	4.40E-01	Normal

Dado que los resultados indican que los datos se distribuyen en forma normal, se efectuará una prueba paramétrica t para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas.

2. Prueba t, comparación de medianas

La prueba t compara las medias de las dos muestras, construyendo intervalos de confianza para cada media y para la diferencia entre las medias, si el intervalo contiene el valor 0 se asume que no existen diferencias significativas entre las medias de las muestras (se acepta la hipótesis nula), con un 90% de nivel de confianza.

El valor de P confirma lo anteriormente señalado, si este es mayor a 0,1 se asume que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los muestreos con un 90% de nivel de confianza.

El cuadro 2 muestra el resultado de la prueba t efectuada a los incrementos volumétricos mensuales (en m³/ha) para determinar si existen diferencias significativas entre Cajones y Lircay.

Cuadro 2. Resultados de la prueba t para establecer diferencias de incremento volumétrico mensual (m³/ha) entre Cajones y Lircay.

Hipótesis nula	Hipótesis Alternativa	t	P
Ho: Cajones = Lircay	H1: Cajones ≠ Lircay	-1.9445	0.0672
Intervalo de confianza			
[-0.49166 , -0.4341]			

Dado que el valor 0 no se encuentra dentro del intervalo de confianza, y que el valor de P es menor a 0,1, se asume que existen diferencias estadísticamente significativas en el incremento volumétrico mensual (m³/ha) entre Cajones y Lircay.

ANEXO 5
**Ajuste de modelos que relacionan la evapotranspiración neta y el incremento
en volumen para Cajones y Lircay.**

1. Relación entre la evapotranspiración neta y el incremento en volumen.

Por medio del software estadístico Curve expert 1.3 se ajustaron modelos que relacionaran las variables evapotranspiración neta mensual (mm) e incremento en volumen a nivel mensual (m³/ha).

Cuadro 1. Valores mensuales de evapotranspiración neta e incremento en volumen (m³/ha).

	Cajones		Lircay	
	EVTn	ICA (m3/ha)	EVTn	ICA (m3/ha)
Oct.	120,1	0,8	105,2	2,4
Nov.	39,7	0,5	49,1	1,6
Dic.	33,9	0,4	56,6	1,2
Ene.	24,2	0,4	18,5	1,5
Feb.	13,5	0,5	8,4	0,3
Mar.	22,2	1,0	27,2	1,2
Abr.	23,2	1,1	38,0	2,1
May.	37,1	1,3	49,4	0,7
Jun.	51,2	0,7	69,9	0,3
Jul.	27,7	0,3	33,9	0,5
Ago.	29,4	1,0	42,5	2,2
Sep.	46,3	1,9	58,3	1,8

Para el caso de Cajones, el mejor modelo ajustado es "Exponential Association", el cual queda definido por la expresión:

$$y = a \cdot (1 - e^{-bx})$$

Donde: y = Incremento volumétrico mensual (m³/ha).
x = Evapotranspiración neta mensual (mm).

Los coeficientes para el modelo son los siguientes:

$$a = 0,995954$$
$$b = 0,058923$$

La bondad de ajuste del modelo es la siguiente:

$$R^2 = 0,2771$$
$$Syx = 0,4689$$

Para el caso de Lircay el mejor modelo ajustado es el "Hiperbolic Fit", el cual queda definido por la expresión:

$$y = a + b/x$$

Donde: y = Incremento volumétrico mensual (m³/ha).
x = Evapotranspiración neta mensual (mm).

Los coeficientes para el modelo son los siguientes:

$$a = 1,659365$$

$$b = -10,58664$$

La bondad de ajuste del modelo es la siguiente:

$$R^2 = 0,4239$$

$$S_{yx} = 0,7048$$