



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias Forestales

**Alteración de los componentes del balance hídrico
producto del raleo en una plantación joven de
Pinus radiata D. Don, en el secano interior de San
Javier, VII Región**

Patrocinante: Sr. Anton Huber J.

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

RODRIGO IVÁN PARRA CASANELLI

VALDIVIA
2004

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Anton Huber Jäger	_____
Informante:	Sr. Rubén Peñaloza Wagenknecht	_____
Informante:	Sr. Víctor Gerding Salas	_____

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. Anton Huber J.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos en primer lugar a mi profesor patrocinante don Anton Huber, por su constante ayuda en la realización de este trabajo. De la misma forma quiero agradecer a mis profesores informantes don Víctor Gerding y don Rubén Peñaloza por sus importantes aportes a la realización de este trabajo.

Asimismo quiero agradecerle a Ramiro por su valiosa y generosa ayuda que permitieron llevar a buen puerto este trabajo.

A mi familia y seres queridos, porque sin el apoyo de ustedes no hubiese logrado esto.

A mis amigos de la Universidad de la vida, Ricardo, Roberto, Toño, Manuel, Ronald, Jorge, Cristian, Cañu, a los demás que se me olvidan en este momento, a todos ellos les doy las gracias por tan buenos momentos compartidos.

A todas aquellas personas que de una u otra manera han aportado parte de sí para formar lo que soy, muchas gracias.

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico (Proyecto FONDECYT 1010713) y a Forestal Celco, por el financiamiento de este proyecto.

*A mis padres y hermanos, pilar fundamental en esta tarea y en la
vida
Al gran amor de mi vida Helen*

RESUMEN EJECUTIVO

Se evaluó la alteración de los componentes del balance hídrico producto del raleo en una plantación de *Pinus radiata* D Don de cinco años de edad, en el predio de Cajones, propiedad de Forestal Celco, ubicado a 15 km al suroeste de San Javier, en el secano interior de la Séptima Región. A partir de las dos parcelas seleccionados se efectuó un raleo dejando una densidad final de 750 árboles por hectárea (Parcela Cajones 2) y un testigo de 1250 árboles por hectárea (Parcela Cajones 1). Las variables a cuantificar para el balance hídrico fueron medidas en las dos parcelas con el fin de evaluar el efecto inmediato del raleo realizado, durante el lapso de un año (octubre del 2001 a octubre del 2002). Estas variables son la precipitación total (P), captada en un pluviógrafo ubicado a campo abierto a un costado de las parcelas; la precipitación directa (Pd) captada a través de canaletas tipo V en un transecto de cada parcela; el escurrimiento fustal (Ef), utilizando collarines adosados al árbol en forma de espiral. Las otras variables utilizadas fueron estimadas analíticamente como es el caso de las pérdidas de agua por intercepción (Ic) ($Ic = P - (Pd + Ef)$), la precipitación neta (Pn) ($Pn = Pd + Ef$) y la evapotranspiración neta ($EVTP$) ($EVTP = P - Ic - \Delta W - Per - A$). El contenido de humedad del suelo se estimó indirectamente a través de una sonda de neutrones, para mediciones en profundidad. La percolación fue captada a través de tres bandejas de percolación conectadas a una bomba extractora.

La precipitación medida durante el período de estudio fue de 1.054 mm, siendo un 30% mayor a la encontrada en un año normal para la zona. Esta se distribuyó en forma normal, registrándose un 0,7% en el primer trimestre, 25,2% en el segundo trimestre, 60,2% en el tercer trimestre y un 13,9% en el cuarto trimestre. El 60% de las precipitaciones se concentró en los meses de mayo, junio y julio dejando a los meses de noviembre, diciembre y enero con el 0,01% de las precipitaciones.

Los componentes del balance hídrico se vieron alterados producto del raleo realizado, principalmente la intercepción y la percolación. La cantidad de precipitación directa en el rodal de cajones 1 fue de 611 mm y en cajones 2 fue de 681 mm, siendo superior este último por un 6,6%. El escurrimiento fustal en tanto, alcanzó el 2,6% de la precipitación total en cajones 1 siendo mayor que en cajones 2 que solo logró un 1,8% por este proceso. La precipitación neta se comportó de la misma forma que la precipitación directa ya que los montos de escurrimiento fustal son muy pequeños. Las pérdidas de agua por intercepción del dosel fueron mayores en el rodal de cajones 1 en comparación con cajones 2 siendo un 39,4% y 33,6% respectivamente, alcanzando esta diferencia los 60 mm. El contenido de humedad del suelo tuvo una distribución temporal similar a la de las precipitaciones, oscilando en promedio entre los 13,9 y los 22,3% para cajones 1 y entre 12,2% y 17,7% para cajones 2, encontrándose al final del período de estudio con -14,5 y 3,2 mm de humedad respectivamente. La percolación alcanzó los 105,3 mm en cajones 1, mientras que, en cajones 2 alcanzó los 154,2 mm, presentándose en los meses de junio, julio y agosto.

La evapotranspiración neta de cajones 1 alcanzó los 547,7 mm siendo muy similar a cajones 2 donde alcanzó los 542,7 mm, no observándose una diferencia significativa entre ambos rodales. En el tercer y cuarto trimestre se dieron las mejores condiciones

para la evapotranspiración, alcanzando valores de 140 a 190 mm, respectivamente.

El raleo dio como resultado final una alteración del balance hídrico manifestándose en una disminución de la interceptación, un aumento de la precipitación directa y neta, una disminución del escurrimiento fustal, un aumento en la disponibilidad de agua y un aumento de la percolación. La evapotranspiración neta no se vio alterada producto del raleo.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Antecedentes Generales	3
2.1.1 Ciclo hidrológico	3
2.1.2 Balance hídrico	3
2.2 Componentes del balance hídrico	4
2.2.1 Precipitación	4
2.2.2 Pérdidas de agua por intercepción	4
2.2.3 Precipitación directa	5
2.2.4 Escurrimiento fustal	5
2.2.5 Precipitación neta	6
2.3 Agua en el suelo	7
2.3.1 Capacidad de campo y punto de marchitez permanente	7
2.3.2 Infiltración	7
2.3.3 Percolación	7
2.4 Evapotranspiración	8
2.5 Efecto del raleo sobre el balance hídrico	8
3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	11
3.1 Área de estudio	11
3.1.1 Características climáticas	11
3.1.2 Características del suelo	12
3.1.3 Características de las parcelas	12
3.2 Metodología	13
3.2.1 Aportes y pérdidas de agua	15
3.2.2 Contenido de agua en el suelo	16
3.2.3 Percolación	16
3.2.4 Consumo por evapotranspiración	16
3.3 Análisis estadístico de los datos	17

4.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	19
4.1	Precipitación Total	19
4.2	Redistribución de las precipitaciones	20
4.2.1	Precipitación directa	20
4.2.2	Escurrimiento fustal	22
4.2.3	Pérdidas de agua por intercepción	24
4.2.4	Precipitación neta	26
4.3	Contenido de agua en el suelo	26
4.4	Evapotranspiración neta y percolación	29
4.5	Balance hídrico	32
5.	CONCLUSIONES	34
6.	BIBLIOGRAFÍA	35
	ANEXOS	

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del hombre ha estado a través del tiempo ligado en general a la fertilidad de los suelos, a la productividad de los bosques, energía radiante y a la presencia de agua. De esta manera, el agua es un recurso fundamental, no sólo como fuente de vida, sino que también como parte de los procesos productivos asociados a la creación de asentamientos humanos.

El ciclo hidrológico en un ecosistema es de gran importancia, puesto que el agua regula la fisiografía de la vegetación y la distribución de los animales, constituyendo además un factor determinante de formación del suelo. Por esto, las decisiones que afectan al recurso agua, deben ser tomadas basándose en un conocimiento riguroso, identificando todos los efectos que podría provocar una alteración del ciclo hidrológico en los ecosistemas.

En la actualidad, los bosques no sólo proveen de materia prima como lo es la madera, sino que además son fuente de productos secundarios como frutos y hongos y cumplen funciones igualmente importantes como son la conservación del suelo y fauna, el paisajismo y la regulación del ciclo hidrológico. Considerando este último elemento, se hace necesario estudiar cómo el agua se mueve dentro de un ecosistema forestal y cuál es el efecto de las intervenciones antrópicas en él.

En Chile, actualmente las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don se extienden desde los paralelos 34 al 40° S aproximadamente, abarcando diversas condiciones edafoclimáticas. En el extremo norte de esta zona, se desarrollan en un clima mediterráneo de semiaridez que condiciona el crecimiento de las plantaciones, siendo la disponibilidad de agua una limitante esporádica o habitual. Este es el caso de grandes extensiones de plantaciones forestales de la VII Región, establecidas en el Secano Interior donde el clima presenta una prolongada estación seca y donde los suelos, de origen metamórfico o granítico, presentan un máximo de 18% de agua útil. En esta zona, según INFOR (2001), la superficie plantada alcanza poco más de 390 mil hectáreas, de las cuales el 93% corresponden a plantaciones de *Pinus radiata*.

El estado de desarrollo de las plantaciones, y su manejo, ejercen una influencia fuerte sobre las características hidrológicas. Es así que, al raleo una plantación se produce un aumento del crecimiento de los árboles producto de un incremento en la cantidad de luz y energía disponible por individuo, cambios en las reservas de agua del suelo, evapotranspiración, intercepción y percolación (Calder, 1992; Huber y López, 1993 y Fahey, 1994).

Tomando en cuenta lo anterior y que en la actualidad los estudios de balance hídrico en esta zona del país son escasos, se justifica realizar experiencias que permitan mostrar el efecto de las plantaciones y el raleo sobre los componentes del balance hídrico, para así, definir las acciones futuras de manejo forestal y disminuir el impacto que representan la intervenciones silvícolas.

Como hipótesis de trabajo se plantea que el raleo de una plantación forestal joven en el secano interior de la Séptima Región altera los componentes del balance hídrico,

especialmente tasas anuales de intercepción y percolación.

El objetivo de este trabajo es cuantificar y comparar los componentes del balance hídrico y de la humedad del suelo en un rodal de *Pinus radiata* con dos esquemas de manejo en el secano interior de San Javier, Séptima Región.

Para cumplir con el objetivo antes propuesto se presentan los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Determinar y comparar para cada parcela en estudio los componentes de la redistribución de las precipitaciones: la precipitación total, las pérdidas de agua por intercepción, la precipitación directa, la precipitación neta y el escurrimiento fustal.
- ✓ Determinar y comparar la variación temporal y espacial del contenido agua del suelo para cada parcela en estudio hasta una profundidad de 3 metros.
- ✓ Determinar y comparar la evapotranspiración neta y la percolación de cada parcela en estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Generales

2.1.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es un término que se utiliza para describir la circulación continua del agua en sus diversas formas y sistemas de almacenamiento en todo el planeta (Pritchett, 1990). En términos generales, el ciclo hidrológico consiste en un intercambio de agua entre la tierra y la atmósfera, el que se produce mediante la precipitación y la evaporación (Donoso, 1994).

Según Liebsche (1982), este ciclo involucra una serie de subprocesos de gran importancia, de entre los cuales es posible destacar: intercepción, evapotranspiración, escurrimiento fustal, precipitación directa e infiltración. En todos estos subprocesos el tipo de vegetación y la distribución temporal de la precipitación juegan un rol fundamental.

2.1.2 Balance hídrico

Lee (1980), define el balance hídrico como un simple proceso de contabilidad que se basa en el principio de conservación de masas. La idea central aplicada a cualquier sistema hidrológico es que la suma algebraica de todos los elementos de flujo puede ser igual a cero cuando los aportes y las pérdidas de agua a fluir se dan en signos opuestos. Así entonces:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} \pm \text{Cambio de almacenaje} = 0$$

La principal entrada de agua a un sistema terrestre es la precipitación, aunque también lo son los flujos subterráneos o superficiales al área. La salida puede consistir totalmente en evapotranspiración, pero puede incluir los drenajes superficiales y subsuperficiales desde el sistema (figura 1).

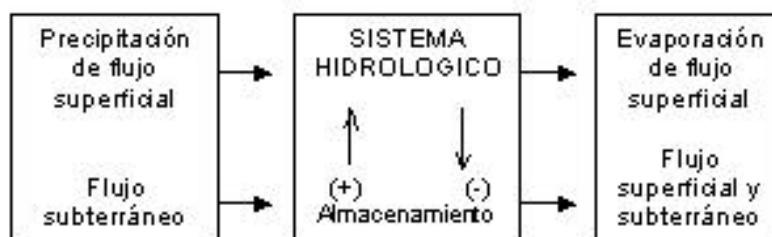


Figura 1. Ecuación de elementos de almacenamiento (modificado de Lee, 1980)

Calder (1992), Huber y López (1993) y Fahey (1994) argumentan que la modificación, sustitución o extracción total o parcial de una cubierta vegetal, genera variaciones en el ciclo hidrológico, conduciendo principalmente a cambios en las reservas de agua del suelo y en la cantidad de agua involucrada en evapotranspiración, intercepción y percolación. En el caso de las plantaciones forestales, la densidad influye en el balance hídrico ya que existe una relación directa entre la cantidad de agua involucrada en la

evapotranspiración y la densidad del rodal (Huber *et al.*, 1998). Sin embargo, esta relación de la densidad con la evapotranspiración y la percolación se advierten sólo en los años posteriores al raleo, disminuyendo los efectos con el tiempo (Alvarez y Giglio, 1997).

2.2 Componentes del balance hídrico

2.2.1 Precipitación

Se denomina precipitación a la caída del agua desde las nubes producto de la condensación del vapor de agua contenido en el aire. Esta precipitación se puede presentar en diversas formas líquidas: lluvia, llovizna, chubascos; y en estado sólido: nevada, nieve granulada y granizo (López y Blanco, 1976).

El agua que ingresa a un ecosistema depende del régimen de lluvias y está asociado a la posición geográfica de la región, la circulación planetaria de las masas de nubes y aire, la temperatura y las características de la vegetación, entre otros factores (Grimm y Fassbender, 1981).

2.2.2 Pérdidas de agua por intercepción

Se define como la fracción de la precipitación que es retenida por la superficie de la vegetación, y que más tarde es evaporada o absorbida por la planta (Xiao *et al.*, 2000), no alcanzando la superficie del suelo (Donoso, 1994). Esta evaporación del agua interceptada por la vegetación está regulada, entre otros factores por la temperatura, la radiación solar, el déficit de saturación del aire y la velocidad del viento (Grimm y Fassbender, 1981; Huber y Oyarzún, 1984; Iroumé y Huber, 2000).

Dentro de los factores de la vegetación que aumentan o disminuyen las pérdidas de agua por intercepción están la densidad, la cobertura de copas, las características del dosel y las características del fuste. De la misma forma, factores ambientales como la duración, tipo, cantidad, frecuencia e intensidad de las precipitaciones y las condiciones meteorológicas que las acompañan (Lee, 1980; Huber *et al.*, 1985; Huber y Oyarzún, 1990; Huber y Trecaman, 2000b).

Asimismo, bosques que poseen una mayor cobertura de copas, presentan una mayor intercepción y a medida que disminuye la intensidad de las precipitaciones, aumenta la intercepción. Esto se produce debido a una retención completa de la lluvia por parte del dosel, impidiendo que se sature, gotee y pase a formar parte de la precipitación directa. De la misma forma, lluvias breves, separadas y una disminución del déficit de saturación del aire provocan un aumento de la participación de este componente (Oyarzún *et al.*, 1985).

Zinke (1967) y López y Blanco (1976) comentan que la edad de los bosques tiene una relación directa con la capacidad de intercepción, alcanzando los valores máximos entre el cierre de copas y la culminación del incremento anual; posteriormente, la intercepción registra una disminución debido a que los árboles comienzan a morir, producto de la competencia por luz y nutrientes.

Del mismo modo, estudios de Huber y Oyarzún (1983), muestran un valor para la intercepción de 10,3%, en una plantación adulta de *Pinus radiata*, al norte de Valdivia, con una densidad de 733 árboles por hectárea. De igual forma, precipitaciones con aportes inferiores a 20 mm, discontinuas o de baja intensidad, permiten intercepciones más altas, debido a que gran parte de la lluvia es retenida por las copas o está expuesta a un mayor tiempo para evaporar Huber y Oyarzún (1983).

Huber y Trecaman (2000b), en un estudio en el que evaluaron el efecto de la forestación de suelos rojos arcillosos sobre el recurso hídrico, en la zona de Collipulli, manifiestan que la intercepción del dosel redujo entre un 25 y 30% la cantidad de agua que alcanza el suelo.

2.2.3 Precipitación directa

Se define como la fracción de lluvia que llega al piso del bosque atravesando los espacios abiertos del dosel, más la que gotea por ramas y follaje (Lee, 1980; Oyarzún *et al.*, 1985; Donoso, 1994; Xiao *et al.*, 2000).

En general, la precipitación directa presenta una distribución temporal similar a la precipitación, siendo mayor mientras mayor es la precipitación. Sin embargo, esta relación no existe cuando las precipitaciones son menores debido a una mayor retención de las copas. Los valores de precipitación directa en relación a la precipitación total va de 60 a 90%, siendo menor para coníferas que latifoliadas (Lee, 1980).

Asimismo, a medida que aumentan la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones, se incrementan los montos de precipitación que logran atravesar el dosel del bosque. Aspectos como un menor déficit de saturación y una menor acción del viento también tienen un efecto sobre la precipitación directa, aumentando sus aportes al suelo forestal (Huber y Oyarzún, 1990; Menzel, 1993).

De la misma manera, su cantidad se relaciona inversamente con la densidad del rodal, siendo mayor en bosque más abiertos, en rodales de intolerantes, especies pioneras y a edades más tempranas del rodal (Lee, 1980; Huber y Oyarzún, 1983).

Ford y Deans (1978), encontraron valores promedios de precipitación directa de sólo un 43% de la precipitación total, para un rodal joven de *Picea sitchensis*. Estos valores los atribuyeron a la alta densidad y a la estructura de las ramas.

Huber y Oyarzún (1983), en un estudio de precipitación neta e intercepción en un bosque de *Pinus radiata* de 26 años de edad en Valdivia, encontraron resultados de montos mensuales de precipitación directa que fluctuaron entre 39,9% y 86,9%, explicando la variación principalmente debido a las características de la precipitación y a las condiciones meteorológicas predominantes.

2.2.4 Escurrimiento fustal

Es la porción de lluvia que ha sido interceptada por la cubierta vegetal y que llega al piso del bosque deslizándose por los fustes (Lee, 1980; Oyarzún *et al.*, 1985; Xiao *et al.* 2000). Esta variable es de gran importancia en aquellos lugares y períodos donde las

precipitaciones son bajas, debido a que se distribuye en una pequeña banda alrededor de la base del tronco, permitiendo una mayor penetración vertical del suelo (Huber y Oyarzún, 1983).

Dentro de los factores morfológicos que inciden en los montos del escurrimiento fustal, están la forma de la hoja, longitud del fuste, rugosidad de la corteza, el ángulo de inserción de las ramas y caducidad o no de la especie. Es así que, hojas cóncavas y con ángulos por sobre la horizontal pueden conducir al agua hacia la rama y luego hacia el fuste. Este no es el caso de las hojas dispuestas en forma vertical que sólo favorecen el escurrimiento fustal cuando gotean sobre ramas inferiores.

De la misma forma, cortezas fácilmente humectables y lisas presentan un mayor escurrimiento fustal, mientras que cortezas absorbentes y gruesas se saturan más tardíamente (Crockford y Richardson, 1990). Igualmente importante es mencionar el ángulo de inserción de las ramas, el que al ser vertical tendrá una mayor posibilidad de transformar esa precipitación en escurrimiento fustal, con respecto a ramas más horizontales.

Entre de los factores climáticos que afectan los montos de escurrimiento fustal, se encuentran la intensidad y ángulo de precipitaciones, la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa (Crockford y Richardson, 1990). Así, altas intensidades de precipitación, logran saturar rápidamente la senda de fluido originando el inmediato goteo desde las ramas.

De la misma forma, ángulos de precipitaciones más horizontales, permiten que el escurrimiento fustal inicie más rápido, ya que no es necesaria la humectación de todo el fuste para que comience dicho proceso (Crockford y Richardson, 1990).

En general, los montos de escurrimiento fustal son pequeños. Lee (1980) señala montos medios de 6% sobre las precipitaciones en latifoliadas y 3% en coníferas.

Huber y Oyarzún (1983), en un estudio de precipitación neta e intercepción en una plantación de *Pinus radiata* de 26 años de edad en Valdivia, encontraron aportes de agua por escurrimiento fustal que fluctuaron entre los 5,7 y 14,8% dependiendo de las características de la precipitaciones, siendo necesario 6 mm de precipitación para que se manifestara dicho proceso.

2.2.5 Precipitación neta

Se denomina precipitación neta a la cantidad de precipitación que llega al suelo del bosque y corresponde a la suma entre la precipitación directa y el escurrimiento fustal (Xiao *et al.*, 2000). A excepción de climas lluviosos, donde el escurrimiento fustal tiene cierta importancia relativa, la precipitación neta está constituida fundamentalmente por el agua de precipitación directa (Oyarzún *et al.*, 1985).

Como en términos de volumen de agua el escurrimiento fustal es pequeño, los factores que regulan la precipitación neta son los que determinan la fracción de agua involucrada en la precipitación directa (Oyarzún *et al.*, 1985).

2.3 Agua en el suelo

2.3.1 Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

La capacidad de campo es el contenido de agua en el suelo una vez que ésta ha drenado libremente el perfil. Se alcanza aproximadamente entre las 24 y 48 horas después de la saturación del suelo y se considera que en este nivel la disponibilidad de agua es máxima. Se le asocia un valor de tensión $\geq 0,3$ bares (Honorato, 1993).

El punto de marchitez permanente es el contenido de agua en el suelo en el cual una plántula de maravilla se marchita sin poder recuperarse al restablecer el contenido de humedad. En este punto se le asocia un valor de tensión ≥ 15 bares, punto que se caracteriza porque el agua es retenida con mucha fuerza alrededor de las partículas del suelo y las raíces no son capaces de obtener esta agua (Honorato, 1993).

El agua que queda disponible para las plantas es la que se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Ésta varía entre suelos y depende finalmente de: la textura, estructura, características del sistema poroso y contenido de materia orgánica del suelo (Honorato, 1993).

2.3.2 Infiltración

Es el proceso por medio del cual el agua líquida entra al suelo mineral (Lee, 1980). Los principales factores que la afectan pueden agruparse en los siguientes elementos: textura, estructura y características del suelo, vegetación y características de la lluvia.

La capacidad de infiltración de un suelo es la permeabilidad al agua que éste tiene, o la habilidad del suelo de aceptar agua y permitir el paso a través de él. La capacidad de infiltración del suelo depende básicamente de la porosidad y del contenido de humedad del suelo. Respecto de este último factor, la infiltración disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo, debido a que los poros se llenan de agua y los materiales coloides se hinchan, de tal modo que disminuye la cantidad de agua que puede penetrar el suelo (Donoso, 1994).

2.3.3 Percolación

La percolación se refiere a la circulación general del agua dentro de un suelo saturado, proceso que viene precedido de una infiltración (Martínez y Navarro, 1996). Se distingue del proceso de infiltración porque éste último es el movimiento vertical del agua desde o a través de la zona no saturada hasta el nivel freático o zona saturada (Monsalve, 1999).

Para Donoso (1994), es la fracción de agua que no es evaporada ni transpirada y que no escurriendo superficialmente penetra en el suelo hasta alcanzar las napas freáticas. El mismo autor señala que depende de la cantidad de agua de lluvia caída, duración de la misma y de la capacidad de infiltración del suelo.

En un estudio realizado por Huber y Trecaman (2000b), en el que evaluaron el efecto

de la forestación de suelos rojos arcillosos sobre el recurso hídrico, en la zona de Collipulli, se observó que al disminuir en cerca de un 50% la densidad inicial, la percolación aumentó en cerca de un 7%.

2.4 Evapotranspiración

Evaporación es el proceso físico por medio del cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso y retorna a la atmósfera directamente en forma de vapor. Se produce cuando el agua está en contacto con una atmósfera no saturada a la misma temperatura. Dicha variable se ve influenciada por la radiación solar, la temperatura del aire, la tensión de vapor y la velocidad del viento (López y Blanco, 1976; Lee, 1980; Fernández, 1996).

La transpiración es el resultado de un proceso fisiológico mediante el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso en el interior de las plantas y retorna a la atmósfera a través de los estomas de las hojas (Fernández, 1996).

La suma de ambos procesos, es decir la evaporación y la transpiración, se denomina evapotranspiración (López y Blanco, 1976; Lee, 1980; Fernández, 1996). Autores como Novoa (1998) y Putuhena y Cordery (2000) la denominan evapotranspiración neta para diferenciarla de la evapotranspiración total que incluye las pérdidas por interceptación. Factores ambientales como la temperatura del aire, déficit de saturación y velocidad del viento, además de factores propios de la vegetación como son las características fisiológicas de la planta, alcance del sistema radicular y grado de cobertura, inciden en la variación de dicho componente (López y Blanco, 1976; Lee, 1980; Huber y García, 1999).

2.5 Efecto del raleo sobre el balance hídrico

El raleo se puede definir como la regulación sistemática de la densidad en los rodales jóvenes, con el fin de estimular el crecimiento de los árboles remanentes, mejorar la calidad del rodal residual y maximizar el valor final del cultivo. Dicho raleo puede producir distintos efectos ambientales, tales como, incremento en el crecimiento de los árboles, aumento en la disponibilidad de agua del suelo y aumento en la cantidad de luz y energía disponible. En esta línea, estudios en especies de coníferas como *Pinus radiata*, muestran que el raleo puede repercutir en el incremento del crecimiento, producto de una mayor cantidad de agua y energía disponible por individuo (Bréda *et al.*, 1994).

Asimismo, si este efecto se produce en grandes extensiones podría alterar el clima de un lugar determinado (Calder, 1992). De la misma manera, Roberts (2001), afirma que la manipulación de la cobertura forestal, ya sea después de la cosecha, nuevas plantaciones forestales o deforestación, podrían influenciar la cantidad y calidad del agua.

Al mismo tiempo, existe la certeza que al convertir y/o raleo una plantación forestal la producción de agua se incrementa temporalmente, evidenciando el efecto del manejo sobre este recurso (Fahey, 1994). En este aspecto, Calder (1992) muestra que por cada

10% de reducción de la cobertura forestal, ésta resulta en un incremento en la producción anual de 40 mm para coníferas y de 25 mm para latifoliadas.

Fuentes y Hernández (1993) y Huber *et al.* (1998) aseveran que el manejo afecta el balance hídrico de una plantación, porque se altera la cantidad de agua que alcanza el suelo, la utilizada por transpiración y, por lo tanto, la distribución espacial y temporal de la disponibilidad de agua del suelo. En relación con esto, una investigación presentada por Fahey (1994), en la que se evaluó el efecto de la densidad sobre el balance hídrico en una plantación de *Pinus radiata*, concluye un aumento extra de 200 mm de agua, representando un incremento del 13% en la disponibilidad de agua luego del raleo.

Roberts (2001) indica que inmediatamente después del raleo las deficiencias de agua del suelo bajo el bosque pueden ser satisfechas producto de una mayor disponibilidad, debido a un efecto de menor cobertura del bosque. Luego de esto, se produce una estabilización de la disponibilidad de agua en el suelo, ya sea producto de la regeneración natural o por un cambio en la superficie del suelo que produce un mayor escurrimiento superficial.

Aussenac *et al.* (1969) al nordeste de Francia, estudiando el efecto del raleo en una plantación de 19 años de *Pseudotsuga menziesii* encontraron que un raleo del 50% de la densidad inicial (2.932 árboles/ha) produce un aumento de la reservas de agua del suelo principalmente después de los primeros tres años, con el consiguiente efecto sobre el balance hídrico.

Huber *et al.* (1998) encontraron que al ralear un rodal de *Eucalyptus nitens* entre un 50 y un 40% de la densidad inicial en la zona de Collipulli, el rodal más denso evapotranspiró un 3% más e interceptó un 7% más que el rodal menos denso, lo que derivó en un 12% menos de percolación. De la misma forma se observó una relación directa entre la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración y la densidad del rodal. Esto estaría explicado por la mayor biomasa aérea que tienen los rodales más densos, lo que aumenta las pérdidas de agua por interceptación y además, ejercen una mayor demanda sobre el agua edáfica por transpiración. En este mismo estudio se observa además que la precipitación neta oscila entre 69 y un 76%, resultando una relación inversa entre la densidad y la precipitación neta.

Stoneman (1993) en Australia, analizó los efectos ambientales del raleo de una plantación de *Eucalyptus marginata*, encontrando una disminución de la transpiración entre un 13-18% y un 11% en la interceptación.

Huber y Trecaman (2000b) observaron que al disminuir en 50% la densidad en una plantación de *Pinus radiata*, las pérdidas por interceptación disminuían en cerca de un 3,5%. Esta interceptación varía dependiendo del clima, existiendo un aumento de la interceptación a medida que disminuye la latitud, producto del aumento de la estación seca y una mayor evaporación potencial (Iroumé y Huber, 2000).

Bosch y Hewlett (1982) concluyen que la producción de agua se incrementa proporcionalmente con el raleo del bosque. Así, la disminución de la cobertura producto de un raleo, puede ser una medida recomendable para aumentar la cantidad de agua que llega la suelo Huber *et al.* (1998) y Huber y Trecaman (2002).

Oyarzún *et al.* (1985) encontraron que los valores de escurrimiento fustal están fuertemente influenciados por la densidad, estimando valores de entre un 21% y un 12% para un rodal de *Pinus radiata* de mayor y menor densidad respectivamente. A pesar de lo anterior, la plantación de menor densidad logró la mayor cantidad de agua por árbol, lo que se explica en la modificación arquitectónica de la copa producto de un mayor espaciamiento, aumentando la amplitud de ellas y el transporte hacia el fuste del agua captada.

En cuanto a la percolación, Huber *et al.* (1998) encontraron un aumento a medida que la densidad disminuye, resultado de la mayor cantidad de lluvia que llega al suelo, a las menores pérdidas de agua por intercepción y evapotranspiración en los rodales con menor densidad. Resultados similares obtuvieron Ulloa (2000), en una plantación joven de *Pinus radiata* en la zona de Los Ángeles y Moya (2001) en Valdivia, en los cuales se compara una plantación de *Pinus radiata* con distintos esquemas de manejo.

Debido a estos antecedentes es necesario considerar el esquema de espaciamiento de las plantaciones forestales, cuando éstas se establecen donde la disponibilidad de agua es una limitación esporádica o habitual, como es el caso de las zonas con influencia climática mediterránea. Para tal efecto se deberán tener presente los objetivos de optimización de la producción maderera, o del agua excedente o de un equilibrio entre ambos (Huber y Trecaman, 2000a). De la misma forma, debe tomarse en cuenta que los cambios producidos en el balance hídrico pueden persistir hasta por 20 años (Vertessy *et al.*, 1995).

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en dos parcelas experimentales dentro de un rodal de *Pinus radiata* D. Don ubicado en la localidad de Cajones, propiedad de la empresa Forestal Celco, distante 15 km de la ciudad de San Javier, en la VII Región (latitud 35° 40' S, longitud 71° 49' W, figura 2), en territorio calificado como "Secano Interior".

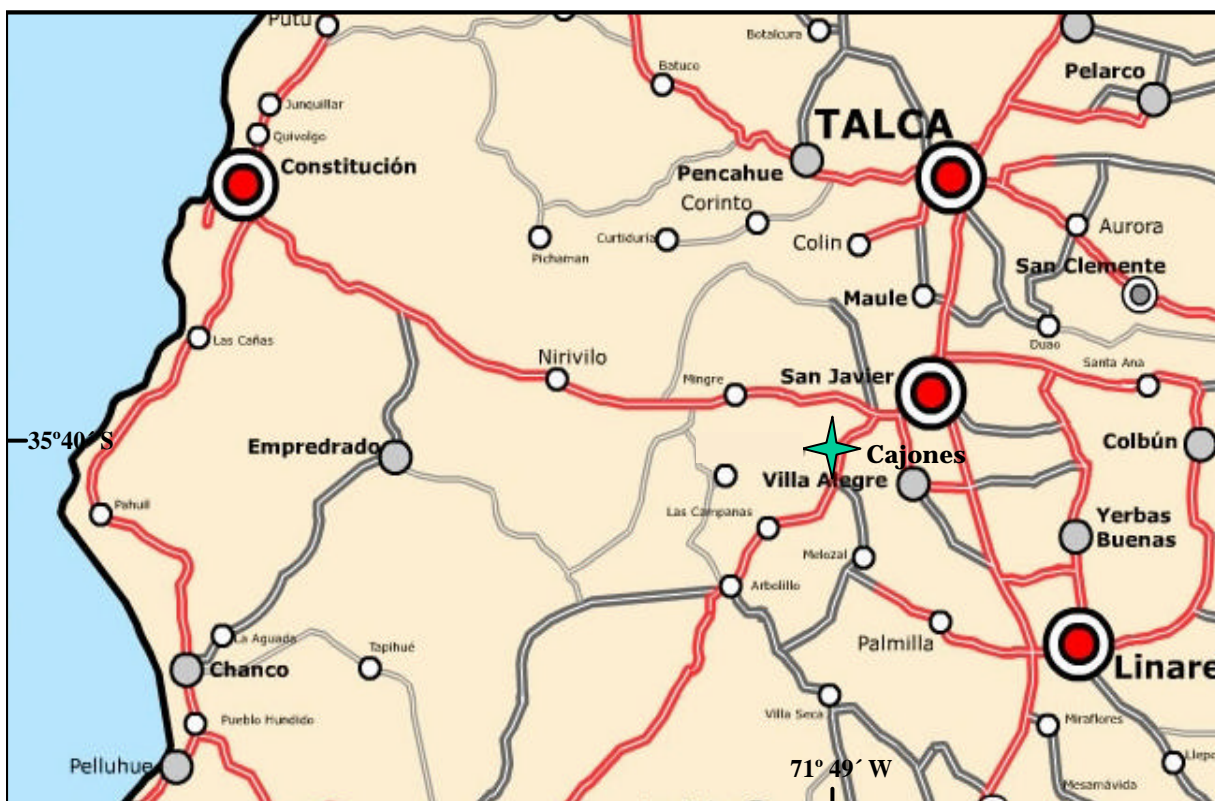


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio

3.1.1 Características climáticas

La zona de estudio presenta un clima Templado Cálido (C_{5b2}), con una estación seca bien definida de 4 a 5 meses (Fuenzalida, 1971). Según Del Pozo y Del Canto (1999), la zona de estudio corresponde al Agroclima Cauquenes, el cual se encuentra en la Depresión Intermedia desde el río Mataquito al Itata. Este clima se caracteriza por un régimen térmico con una temperatura media anual de 14,7 °C, siendo julio el mes más frío con 4,7 °C y enero el mes más cálido con 27 °C. El régimen hídrico se caracteriza por un régimen mediterráneo de lluvias, con una estación seca que corresponde a la época de mayor radiación solar. La precipitación promedio anual es de 735 mm, siendo el mes más lluvioso junio, con 189,6 mm (Novoa, 1989). El período libre de heladas varía de seis a siete meses (Del Pozo y Del Canto, 1999).

3.1.2 Características del suelo

El suelo del área de estudio corresponde a la serie Pocillas (PO 524/Er). Estos suelos ocupan un área que se extiende desde la provincia de Curicó hasta el noroeste de la provincia de Ñuble. El material de origen corresponde al tipo metamórfico, proveniente de rocas sedimentarias y volcánicas. Son suelos con una erosión severa, de drenaje externo muy rápido e interno moderadamente lento, de colores pardo oscuro en superficie y pardo rojizo oscuro en profundidad. Las texturas son franca a franca arcillosa en profundidad; ligeramente plásticos, adhesivos y friable en la superficie a muy plásticos, muy adhesivo y muy friables en profundidad. El pH es ligeramente ácido (6,0-5,8); presentan un contenido medio de materia orgánica y alto de sílice producto de la descomposición de la roca en profundidad. La capacidad de uso de estos suelos varía entre IV y VII (IREN, 1964).

3.1.3 Características de las parcelas

Las dos parcelas a estudiar que se seleccionaron, corresponden a una plantación coetánea de *Pinus radiata* que fue establecida en el año 1997, en la cual se aplicó un raleo sistemático. Ambas parcelas se ubican en situaciones topográficas y de sitio similares, existiendo una distancia aproximada de 100 m entre ellas.

La primera parcela (Cajones 1), presenta una mayor densidad de árboles por hectárea, y un distanciamiento promedio de 2 m por 4 m. La segunda parcela (Cajones 2) presentaba el mismo distanciamiento, pero actualmente tiene una menor densidad producto de un raleo realizado en agosto del 2001. Ambas parcelas están orientadas por la empresa a la producción de madera pulpable.

Las principales características dasométricas de las parcelas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características dasométricas de las parcelas en estudio

Parámetros	Cajones 1	Cajones 2
Edad inicial (años)	5	5
Densidad (árboles/ha)	1.250	700
Altura promedio (m)	10	8,3
Dap promedio (cm)	14,4	13,0
Área basal (m ² /ha)	20,3	9,3
Cobertura del dosel (%)	77,2	44,6

El uso anterior del suelo en la zona de estudio era la agricultura, alternándose la producción de cereales con el uso de praderas; en algunos sectores había plantaciones de vides (IREN, 1964; Ovalle y Pozo, 1994).

Se constató en terreno el manejo del suelo a través de un subsolado y camellones, utilizado para recuperar suelos degradados, mejorando además las condiciones iniciales de establecimiento en las líneas de plantación.

La vegetación acompañante en Cajones 2 es principalmente espino (*Acacia caven*), michai (*Berberis darwini*), litre (*Litreaea caustica*) y herbáceas como diente de león (*Taraxacum officinale*), pasto dulce (*Holcus lanatus*), trébol de hoja ancha (*Trifolium angustifolium*), tembladera (*Briza maxima*) y *Aloe* sp. Esta vegetación cubre cerca del 80% del suelo y en algunos casos la vegetación arbustiva llega a los 2 m de altura.

En la parcela Cajones 1, se observó una menor presencia de sotobosque y herbáceas compuesta por espino (*Acacia caven*), michai (*Berberis darwini*), trébol de hoja ancha (*Trifolium angustifolium*), tembladera (*Briza maxima*) y pasto dulce (*Holcus lanatus*). En esta situación las arbustivas son de menor tamaño y la cobertura herbácea es cercana al 50%.

Una vista panorámica de las situaciones de estudio se observa en la figura 3.



Figura 3. Vista panorámica de las parcelas en estudio. A la izquierda la parcela Cajones 1 y a la derecha la parcela de Cajones 2.

3.2 Metodología

La metodología propuesta a continuación para la estimación y cuantificación de los aportes y pérdidas de agua, contenido de humedad del suelo, evapotranspiración y percolación han sido utilizada en numerosos estudios científicos realizados por autores tales como: Aussenac (1968); Linsley *et al.* (1977); Ford y Deans (1978); Lee (1980); Grimm y Fassbender (1981); Huber y Oyarzún (1983, 1984, 1990); Oyarzún *et al.* (1985); Huber (1991); Huber y López (1993); Huber *et al.* (1998); Huber y Trecaman (2000b), entre otros.

El período de mediciones abarca desde **octubre de 2001 hasta octubre de 2002**

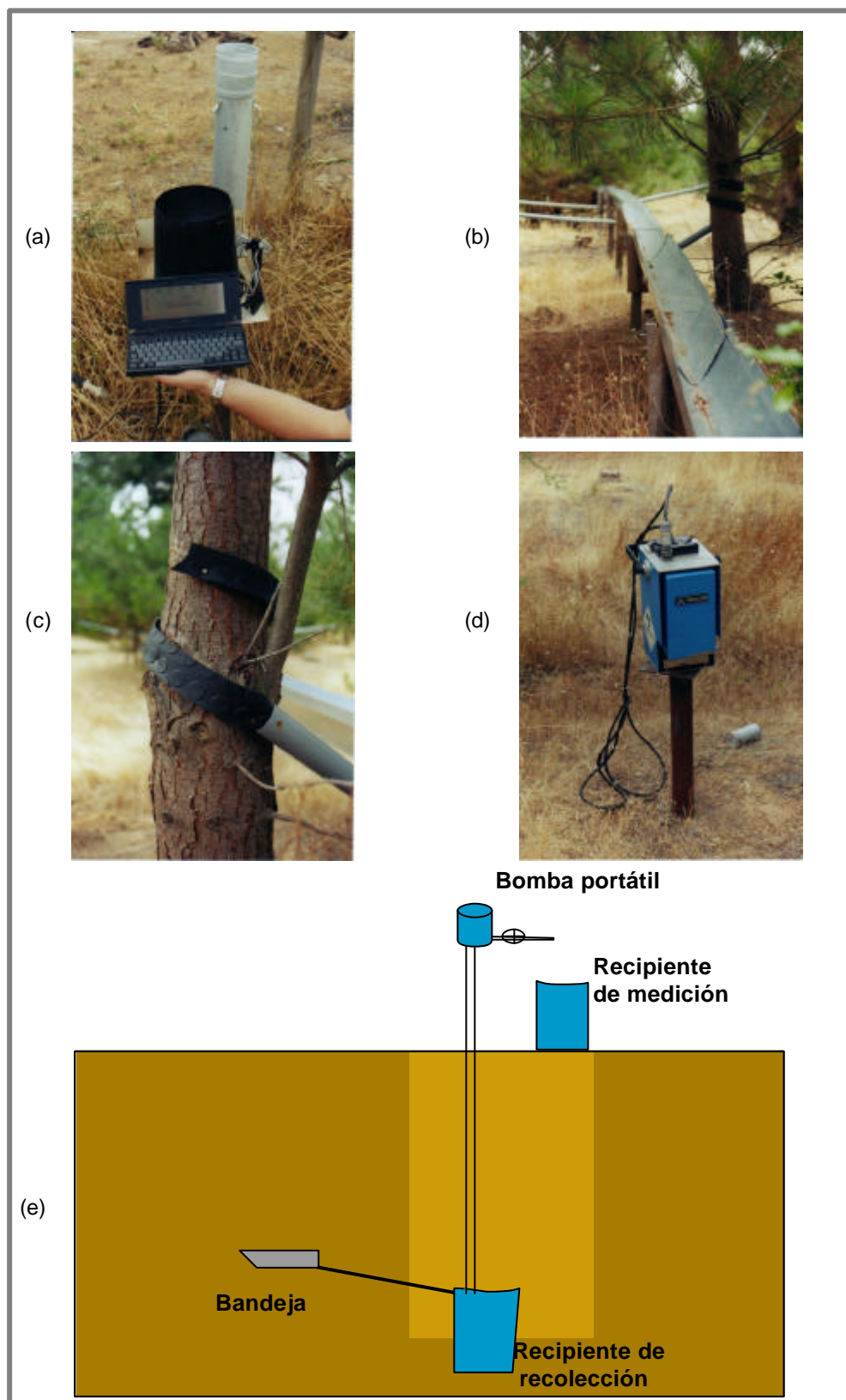


Figura 4. (a) Pluviógrafo y datalogger utilizado en la captura de la precipitación; (b) Canaletas utilizadas en la captura de la precipitación directa; (c) Sistema de collarín utilizado en la captura del escurrimiento fustal, (d) Sonda de neutrones utilizada para el contenido de humedad del suelo y (e) Sistema de bandejas utilizadas para la medición de la percolación

3.2.1 Aportes y pérdidas de agua

Precipitación total. La cantidad de agua incidente de lluvia o precipitación total que llegó a la plantación se consideró equivalente a la registrada por un pluviógrafo (Modelo Hobo Event) ubicado a campo abierto a 100 m de las parcelas de estudio. Este pluviógrafo está conectado a un capturador de datos para el registro automático de los eventos (figura 4a).

Precipitación directa. La precipitación que traspasó el dosel, es decir, que llegó efectivamente al suelo del bosque, se recolectó en una canaleta metálica en forma de "V", de 11 cm de ancho y 25 m de largo, ubicada a 30 cm sobre el suelo (figura 4b). El agua recibida de esta forma se condujo a un estanque registrador automático diseñado para estos fines, el cual estaba conectado a un equipo capturador de datos que permitía el registro automático de los eventos.

Escurrecimiento fustal. La precipitación que alcanzó la superficie del bosque, usando como medio de conducción el tronco de los árboles, se recolectó mediante collarines plásticos ajustados y sellados en forma de espiral alrededor de los fustes. Así se seleccionaron en forma dirigida aquellos árboles más cercanos a la canaleta de captación de agua, independientes del diámetro, siendo 10 un número utilizado en varios estudios * (figura 4c). La precipitación recibida por esta vía fue conducida por tubos de PVC a un estanque registrador independiente. Para determinar el escurrecimiento fustal por unidad de superficie, se utilizó la siguiente relación:

$$E_f = L * A / B * 10.000m^2 \quad (1)$$

Donde:

E_f : Escurrecimiento fustal (mm)
 L : Litros de agua.
 A : Número de árboles por hectárea.
 B : Número de árboles conectados.

Pérdidas de agua por intercepción. La cantidad de precipitación perdida por la intercepción del dosel se calculó a partir de la siguiente relación:

$$I_c = P - (P_d + E_f) \quad (2)$$

Donde:

I_c : Pérdidas por intercepción del dosel (mm).
 P : Precipitación total o incidente (mm).
 P_d : Precipitación directa (mm).
 E_f : Escurrecimiento fustal (mm).

*. Huber (2002), Universidad Austral de Chile; Comunicación personal.

Precipitación neta. La cantidad de precipitación que alcanzó la superficie del suelo al interior de las parcelas. Se estimó asumiéndola como la sumatoria entre la precipitación directa y el escurrimiento fustal, de acuerdo a la siguiente relación:

$$Pn = Pd + Ef \quad (3)$$

Donde :

Pn : Precipitación neta (mm).

Pd : Precipitación directa (mm).

Ef : Escurrimiento fustal (mm).

3.2.2 Contenido de agua en el suelo

La variación temporal y espacial del contenido de agua del suelo (en % de volumen) se determinó en forma indirecta utilizando un dispositivo emisor de neutrones, modelo Troxler 4300, con una fuente radiactiva de americio y berilio para mediciones de humedad en profundidad (figura 4d).

En cada parcela de estudio, se instalaron de forma vertical en el suelo diez tubos de acero inoxidable de 45 mm de diámetro y 300 cm de largo. Para que las mediciones contemplaran todas las situaciones del estudio, dichos tubos fueron distribuidos en forma homogénea, tanto entre hileras como sobre las hileras de la plantación.

El proceso de medición consistió en descender mensualmente por el interior de los tubos el emisor de neutrones, el cual para cada 50 cm de profundidad realizó una medición durante un tiempo de 60 segundos. Esto se llevó a cabo para el total de los tubos y con un intervalo de cuatro semanas durante el lapso de estudio.

3.2.3 Percolación

Para establecer la cantidad de agua percolada, se utilizó la metodología propuesta por Chu - San Lin (1968). En las dos situaciones de estudio se instalaron cuatro bandejas de 30 x 30 cm (900 cm²), a tres metros de profundidad conectadas a un bidón (figura 4e). Mensualmente y con ayuda de un bomba portátil se extrajo el agua almacenada en los bidones a través de un tubo de PVC de 40 mm.

3.2.4 Consumo por evapotranspiración (Evapotranspiración neta)

Para estimar la cantidad de agua consumida por evapotranspiración en las dos situaciones de estudio, se calculó analíticamente, mediante la ecuación general de continuidad del balance hídrico (Feller, 1981):

$$EVTP = P - Ic - DW - Per - A \quad (4)$$

Donde:

EVTP : Evapotranspiración neta (mm).

P : Precipitación (mm).

ΔW	: Variación del contenido de agua del suelo (mm).
lc	: Intercepción (mm).
Per	: Percolación (mm).
A	: Escorrentía superficial.

Como el relieve de las parcelas de estudio tienen una pendiente menor al 5% se consideró que no existe escorrentía superficial. Tampoco fueron considerados los aportes de agua por capilaridad desde al agua subterránea o napa freática, debido a que ésta se encuentra a una profundidad mayor.

En relación a los aportes y pérdidas de agua, se realizaron registros automáticos de los eventos o lluvias los cuales posteriormente eran acumulados para ser trabajados como montos mensuales.

3.3 Análisis estadístico de los datos

Para el procesamiento y posterior manejo de los datos se utilizó una planilla electrónica *MS Excel*®. La información de contenido de humedad fue graficada utilizando el programa *SURFER 6.04*® y los análisis estadísticos se elaboraron con el programa *SYSTAT 9.0*®, con un nivel de significancia del 95%.

Se consideró necesario, antes de ejecutar cualquier análisis estadístico homogeneizar los datos. Para esto se eliminaron aquellos datos anómalos y se ajustaron regresiones calculando así los valores faltantes. Luego de esto se realizó la prueba de normalidad, Shapiro-Wilks, la cual se basa en comparar los valores de la curva de distribución normal con los valores de los datos.

Posteriormente, se diferenciaron dos grupos para los análisis estadísticos. El primero compuesto por todas aquellas mediciones realizadas en ambas situaciones de estudio y que no constan de repeticiones, como es el caso de los componentes de la redistribución. El segundo grupo está compuesto por todas aquellas mediciones que contienen un mínimo de dos repeticiones de las mismas características y en las mismas condiciones, en ambas parcelas de estudio; éste es el caso de las mediciones del contenido de humedad del suelo y la percolación.

En el caso de los componentes de la redistribución, se realizó una comparación de medias mediante la aplicación de las pruebas de *t de Student* (paramétrica) y *W de Wilcoxon* (no paramétrica). La primera es conocida por su gran potencia, mientras que la segunda se recomienda por el grado de exactitud en el nivel de significancia, aunque los datos poblacionales estén muy apartados de la normalidad, como es el caso de los datos pluviométricos que se ajustan a una distribución gamma (Fernández, 1996 y Lehmann y D`Abrera, 1998).

Para el caso especial de la evapotranspiración, además de realizar una comparación de medias, es necesario verificar si existen diferencias significativas en su variación temporal. Para esto se aplicó la prueba estadística de Kolmogorov Smirnov.

Con la observaciones del contenido de humedad del suelo y la percolación se realizó una análisis de varianza, con el fin de evaluar si existen diferencias significativas

entre las parcelas estudiados. Además, se realizó una prueba complementaria al análisis de varianza, que es la prueba de rangos múltiples, el cual permite evaluar las diferencias de humedad del suelo entre las distintas profundidades

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Precipitación total

La cantidad total de precipitación registrada durante el período de medición fue de 1.054,1 mm. Considerando el valor de precipitación normal para la zona (Talca), se observó un superávit del 43%. La precipitación mensual y anual para la zona de estudio se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Precipitación mensual y anual para la zona de estudio (Cajones) y Talca durante el período de estudio (2001-2002)

Mes	Precipitación en Cajones (mm)	Precipitación Talca* (mm)
Noviembre (2001)	4,3	20,9
Diciembre	3,3	11,8
Enero (2002)	0,0	7,0
Febrero	39,1	7,4
Marzo	133,9	13,8
Abril	92,5	37,0
Mayo	232,9	128,5
Junio	133,5	189,6
Julio	267,8	132,6
Agosto	85,1	97,6
Septiembre	30,0	59,9
Octubre	31,7	28,9
Total	1.054,1	735,0

*Fuente: Novoa, 1989.

Al analizar la distribución mensual de las precipitaciones, se observó un déficit en relación al período normal para la zona. Éste se concentró en los meses de noviembre y diciembre del año 2001 y , enero, junio, agosto y septiembre del 2002. A su vez, los meses restantes presentaron un superávit que fluctuó entre 2,8 mm para octubre del 2001 y 120 mm para marzo del 2002.

La distribución temporal de las precipitaciones del lugar de estudio tuvo un comportamiento normal (Anexo 5a), concentrándose cerca del 60% de las lluvias en los meses de mayo, junio y julio, mientras que los meses de noviembre, diciembre y enero representaron menos del 1% del total de ellas.

Del total de las precipitaciones registradas para el año de estudio, un 0,7% ocurrió en el primer trimestre (noviembre, diciembre y enero), un 25,2% en el segundo trimestre (febrero, marzo y abril), un 60,2% en el tercer trimestre (mayo, junio y julio) y un 13,9% en el cuarto trimestre (agosto, septiembre y octubre).

Al comparar estos valores con los de un año normal se observó un importante superávit en el segundo y tercer trimestre, siendo el primer y cuarto trimestre los que presentaron un déficit en sus precipitaciones (figura 5). Asimismo se observó una marcada

distribución estacional, concentrándose principalmente en los meses de invierno y muy escasa en los meses de verano. En este aspecto, los meses de mayo en el segundo trimestre y julio en el tercer trimestre fueron de gran relevancia al superar con creces una situación normal.

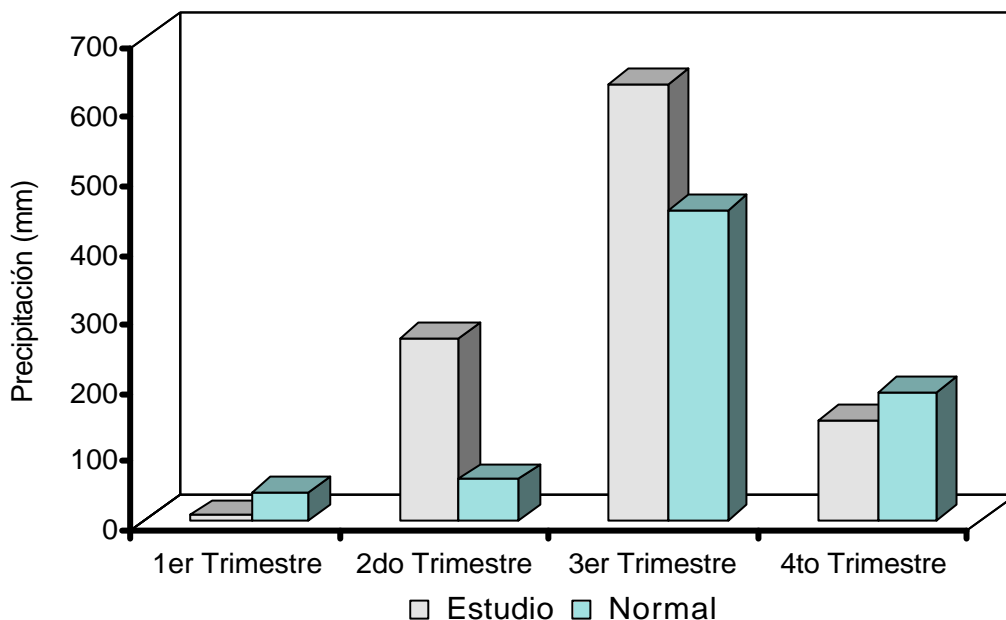


Figura 5. Promedios estacionales de las precipitaciones durante el período de estudio y un año normal

4.2 Redistribución de las precipitaciones

En los anexos 2a y 2b se observan los componentes de la redistribución de las precipitaciones en valores absolutos y relativos respecto a la precipitación total del año hidrológico estudiado.

4.2.1 Precipitación directa

De la cantidad total de precipitación en el período de estudio, el 58% llegó en forma directa a la superficie del bosque en la parcela de Cajones 1, en comparación con un 64,6% en Cajones 2. Estos valores son inferiores a los encontrados en un clima más lluvioso por Oyarzún y Huber (1999), los cuales fluctuaron entre un 90 y 93%. Sin embargo, son levemente superiores a los encontrados por Valenzuela (2003)*, en plantaciones de *Pinus radiata*, en un clima de secano interior, de edad y densidades similares. Asimismo, son superiores a los encontrados por Maragaño (2003), en un clima de secano costero, en plantaciones adultas de *Pinus radiata*, siendo la edad y la densidad de la plantación utilizada lo que explicaría dicha diferencia.

En ambas situaciones de estudio, la precipitación directa presentó una variación temporal similar a la precipitación total, siendo levemente superior en la parcela de menor densidad (figura 6). Esta discrepancia puede atribuirse a la diferente densidad,

* Valenzuela, C. 2003. Comunicación personal.

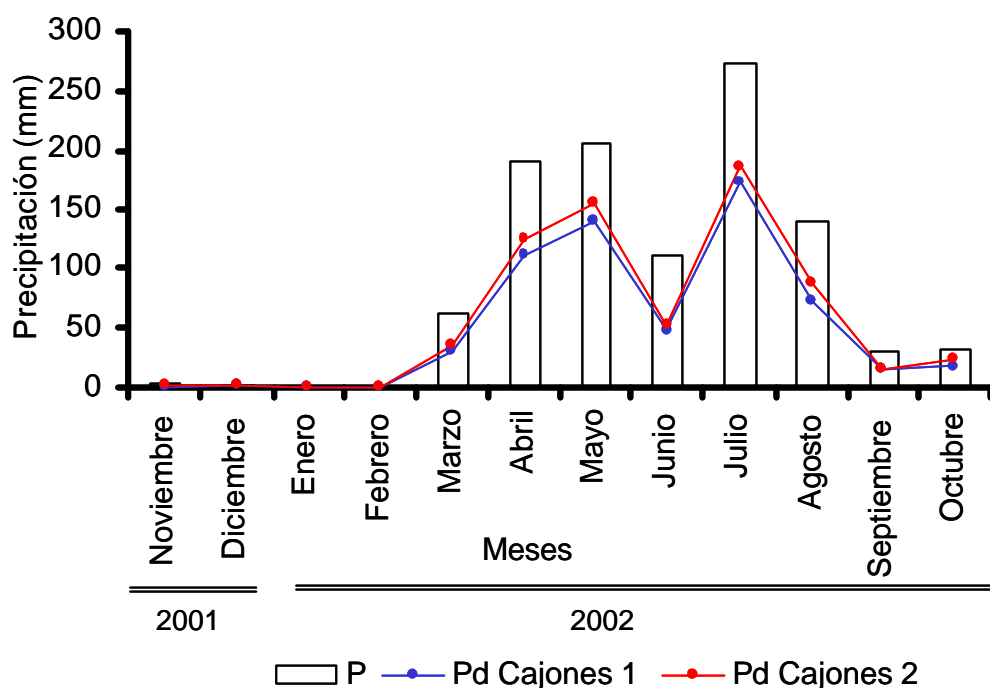


Figura 6. Variación temporal de la precipitación total (P) y la precipitación directa (Pd) en ambas parcelas de estudio

ya que al existir una remoción de la biomasa aérea, se provocan mayores espacios o entradas de agua, lo que incide directamente en un aumento de la precipitación directa. Esto es confirmado al analizar estadísticamente los datos, donde se observó la existencia de diferencias significativas a un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$; Anexo 5b). Además, existe la tendencia estadística que afirma que la precipitación directa en Cajones 1 es menor a la de Cajones 2 (Anexo 5b).

Del mismo modo, se observó un alto grado de correlación entre estas dos variables ($r = 0,99$ para ambas parcelas). La alta correlación entre la precipitación y la precipitación directa ya había sido determinada por Huber y Oyarzún (1990), en una plantación adulta de *Pinus radiata* y por Oyarzún y Huber (1999) para plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. La alta correlación encontrada, permite aseverar que la precipitación es un buen indicador de la precipitación directa, bajo ciertas características climáticas y de cobertura (Iroumé y Huber, 2000).

Estacionalmente, la precipitación directa presentó una distribución similar a la precipitación, encontrándose los mayores montos de precipitación directa en los meses de mayor precipitación (segundo y tercer trimestre), siendo siempre mayores en Cajones 2.

Así, al existir condiciones climáticas favorables en estos trimestres (sobre todo una mayor cantidad de precipitación), se observó un alto porcentaje de precipitación directa en ambas parcelas estudiadas. Esta situación fue distinta en el primer y cuarto trimestre, donde la cantidad de precipitaciones fue menor, por lo que no permitió que se produjera una gran cantidad de precipitación directa.

Las observaciones mencionadas anteriormente son similares a las descritas por Menzel (1983), quien manifiesta que los montos de precipitación directa se ven incrementados a medida que aumenta la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones. Otros aspectos como un menor déficit de saturación y una menor acción del viento también tienen un efecto sobre la precipitación directa, aumentando sus aportes al suelo forestal (Van Dijk y Bruijnzeel, 2001).

4.2.2 Escurrimiento fustal

El escurrimiento fustal presentó valores de 27,6 y 18,7 mm para Cajones 1 y 2 respectivamente, lo que significa un aporte de la precipitación total por este proceso de 2,6% y 1,8% (Anexo 2a y 2b). Estos montos son menores que los comunicados por Lee (1980), quien señala promedios de 3% para coníferas. Asimismo, estos valores son más bajos que los encontrados por Oyarzún y Huber (1999) en plantaciones jóvenes el sur de Chile, situación que debe atribuirse a las distintas condiciones climáticas imperantes en dicho estudio, específicamente a la mayor precipitación de la zona.

De la misma forma, estos valores son similares a los encontrados por Maragaño (2003), en un clima de seco costero y por Valenzuela (2003)*, en la Depresión Intermedia de la VII Región.

En ambas parcelas el escurrimiento fustal presentó una relación directa con la precipitación. De esta manera, en los meses de invierno se registraron los aportes más significativos: 5,2 y 6,5 mm (abril y julio) para Cajones 1 y 3,4 y 4 mm para Cajones 2 (marzo y julio), respectivamente, siendo el mes de julio el de mayor escurrimiento fustal en el periodo de estudio (figura 7). De hecho, se apreció una alta correlación entre la precipitación y el escurrimiento fustal en ambos casos, situación que ya había sido manifestada anteriormente por Oyarzún y Huber (1999) para plantaciones jóvenes de *Pinus radiata*. Debido a lo anterior, se espera una relación directa entre las variables antes mencionadas, principalmente en los meses de invierno.

Asimismo, se observaron mayores montos de escurrimiento en Cajones 1, los que se explicarían por el mayor número de individuos en esta parcela. Lo anterior se confirma al realizar una comparación estadística de las medias de ambas parcelas en las que se observa la existencia de discrepancias entre Cajones 1 y Cajones 2 (nivel de confianza del 95% y $p= 0,02$, Anexo 5b).

Otro elemento que podría influir sobre la cantidad de aporte por este proceso, es el ángulo de inserción de las ramas. Es así que, ángulos más agudos, permiten una canalización del agua desde las ramas hacia el fuste (Crockford y Richardson, 1990). En este sentido mediciones realizadas en estudios paralelos** demuestran que existe una diferencia promedio de 8° en los ángulos de inserción de las ramas de cada parcela (43° Cajones 1, 51° Cajones 2), siendo más agudos en la parte superior del árbol y más rectos en la parte inferior del árbol, identificándose una diferencia que podría influir en el análisis final de esta variable.

* Valenzuela, C. 2003. Comunicación personal.

** Trecaman, R. 2003. Comunicación personal.

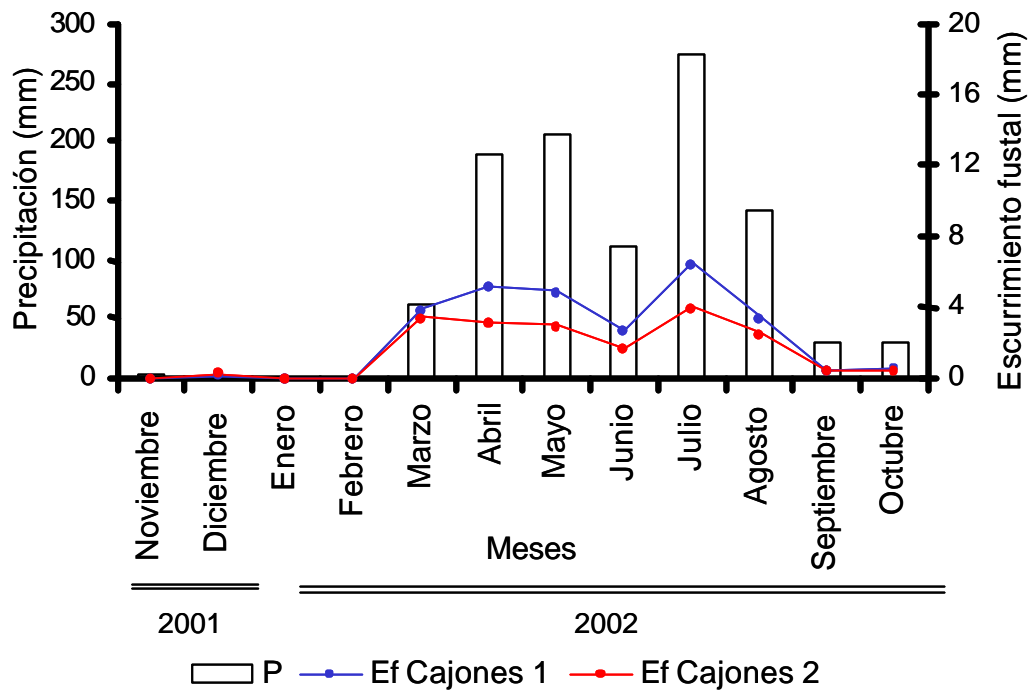


Figura 7. Variación temporal de la precipitación incidente (P) y el escurrimiento fustal (Ef) en ambas parcelas de estudio

Al analizar el escurrimiento fustal en litros por árbol, se observa que existe una mayor cantidad de agua por árbol en Cajones 1 con respecto a Cajones 2 (figura 8). Esto no concuerda con lo estudios de Oyarzún *et al.* (1985), y Crockford y Richardson (1990), los que muestran un aumento de la cantidad de agua captada por individuo luego de la reducción de la densidad de una plantación. La causa de esta contraposición en los resultados se debería a que las mediciones se realizaron en el periodo inmediatamente posterior al raleo, sin considerar que los efectos del raleo sobre el escurrimiento fustal por individuo se manifiesta sólo después de un aumento del tamaño de la copa. En este aspecto el mayor número de árboles y su tamaño permitiría una mayor captación de agua por este medio en Cajones 1 con respecto a Cajones 2 lo que incidiría en esta diferencia encontrada.

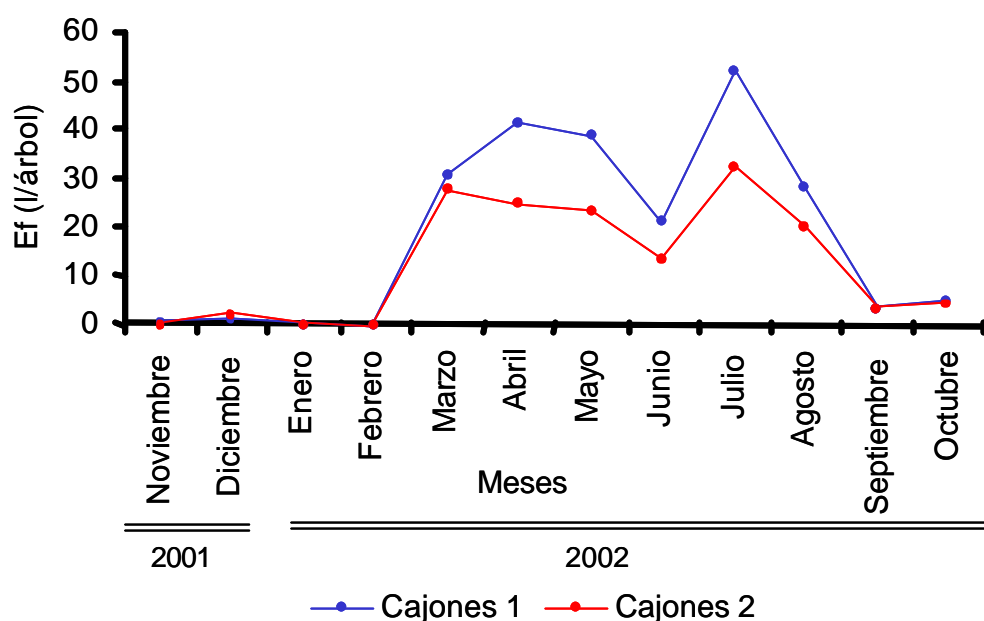


Figura 8. Variación temporal del escurrimiento fustal (l/árbol) para ambas parcelas de estudio

4.2.3 Pérdidas de agua por intercepción

Las pérdidas por intercepción fueron de 415,7 mm (39,4%) en Cajones 1 y 354,2 mm (33,6%) en Cajones 2, pasando a constituir los valores más altos registrados para la especie en Chile (anexo 2a y 2b). Estos valores están por sobre el 5% encontrado por Oyarzún y Huber (1999) en Valdivia y un tanto más cercanos al 25 y 30% encontrados por Huber y Trecaman (2000b) en Collipulli. Estas diferencias están dadas principalmente por las distintas características y condiciones climáticas de la zona de estudio. De hecho, Huber y Iroumé (2001) concluyen, que para plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* de densidades similares, existe un aumento de la intercepción a medida que disminuye la latitud, siendo un aumento de la estación seca y una mayor evaporación potencial la que produce dicha discrepancia.

En todos los meses las pérdidas por intercepción de Cajones 1 fueron mayores en comparación con las de Cajones 2, situación que alcanzó las máximas diferencias relativas en los meses de verano. Esto implica que existe una relación entre la densidad de las parcelas y las pérdidas por intercepción. Lo anterior, se observó al analizar estadísticamente las medias de ambas parcelas, a un nivel de confianza del 95% ($p=0,005$). En este aspecto, la mayor biomasa aérea y por lo tanto mayor cobertura de copas (cercana al 80%) encontrada en Cajones 1 impidió el paso libre de la precipitación hacia el interior del bosque.

Asimismo, al hacer un análisis estacional y mensual de los montos de intercepción de ambos casos, se observó que, existe una relación inversamente proporcional entre la cantidad de precipitación incidente y la fracción de agua interceptada. Dicha situación se explica por una pérdida gradual de la retención de agua por parte de las copas y la capacidad evaporante del ambiente a medida que aumenta la intensidad de las precipitaciones, realidad que ya ha sido estudiada por Huber y Oyarzún (1984).

De la misma forma, se observaron diferencias en el análisis de los valores absolutos con respecto a los valores porcentuales. En términos generales las mayores pérdidas por interceptación en forma porcentual se observaron en aquellos meses de verano donde la precipitación total fue menor; mientras que en términos absolutos se produjeron en los meses de invierno, que fueron los más lluviosos.

La importancia de las pérdidas de agua por interceptación debe valorarse en función del clima y de las demandas hidrológicas de las plantaciones forestales. Precisamente, en invierno cuando hubo más disponibilidad de agua y menor transpiración potencial, la fracción de agua interceptada fue menor. Por otro lado, en los meses de prolongado estío, cuando la reserva de agua del suelo se encontraban prácticamente agotadas, este componente alcanzó valores superiores.

En situaciones como las encontradas en este estudio, de bajas precipitaciones y altas intensidades lumínicas, la interceptación juega un rol fundamental en el balance hídrico. De hecho, la interceptación es el factor que más influye, manifestando valores importantes incluso en periodos donde por lo general disminuye, como es el caso de los meses de invierno. Esta situación, está dada por una condición latitudinal de mayor evaporación potencial y una mayor extensión de la estación seca (Huber e Iroumé, 2001).

Este resultado concuerda con los trabajos de Huber *et al.* (1998), Huber y Trecaman (2000b y 2002) quienes señalan, que las pérdidas de agua por interceptación son el principal impacto de las plantaciones forestales sobre el balance hídrico, especialmente en climas con precipitaciones menores.

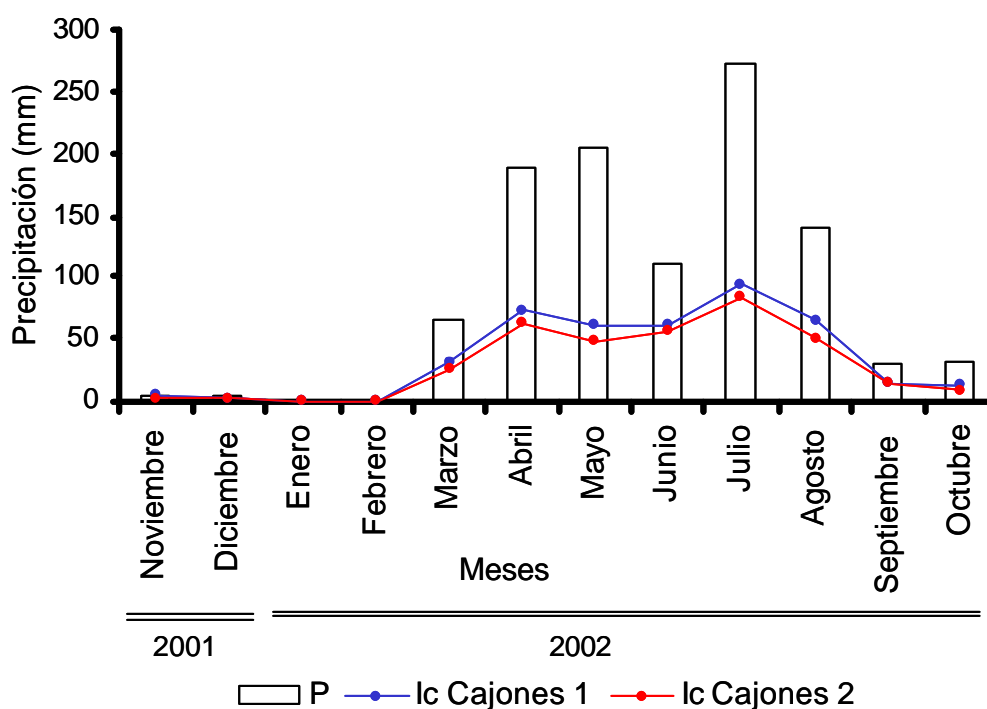


Figura 9. Variación temporal de la precipitación incidente (P) y la interceptación de copas (Ic) en ambas parcelas de estudio

4.2.4 Precipitación neta

Debido a que el escurrimiento fustal alcanzó un valor muy bajo, la precipitación neta tuvo un comportamiento explicado principalmente por el curso anual de la precipitación directa. En los Anexos 2a y 2b se muestra la cantidad de precipitación neta que alcanzó el piso del bosque en ambas situaciones.

En un contexto global, en Cajones 1, la precipitación neta fue de 638,5 mm (60,6%, con respecto a la precipitación incidente), en cambio en Cajones 2, fue de 700,1 mm (66,4%). Estos valores son menores a los encontrados por Oyarzún *et al.* (1985), que oscilaron entre un 86 y 92%, y mayores a los encontrados por Valenzuela (2003)*, en condiciones climáticas y de edad similares.

La variación temporal de la precipitación neta para ambas situaciones en estudio como se observa en la figura 10, fue similar a la variación de la precipitación incidente, coincidiendo los valores más altos de precipitación neta con los valores más altos de precipitación total. Esta situación se repitió en el análisis trimestral, lo que confirman la relación entre la cantidad de precipitación neta y la precipitación incidente. Esta tendencia también es estadística ya que al comparar las medias de ambas parcelas de observó la misma diferencia encontrada por la precipitación directa ($p=0,005$).

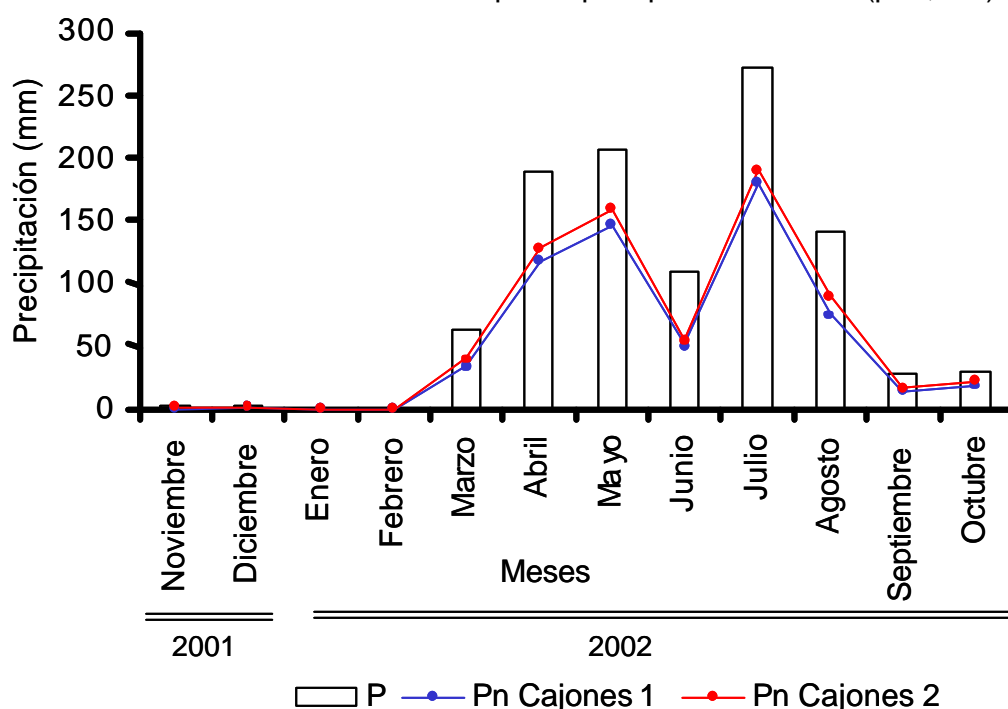


Figura 10. Variación temporal de la precipitación incidente (P) y la precipitación neta (Pn) en ambas parcelas de estudio

4.3 Contenido de humedad del suelo

La variación espacial y temporal del contenido de humedad del suelo hasta los 3 m de profundidad para ambas parcelas de estudio se presenta en los Anexos 3a y 3b y en la figura 11.

* Valenzuela, C. 2003. Comunicación personal.

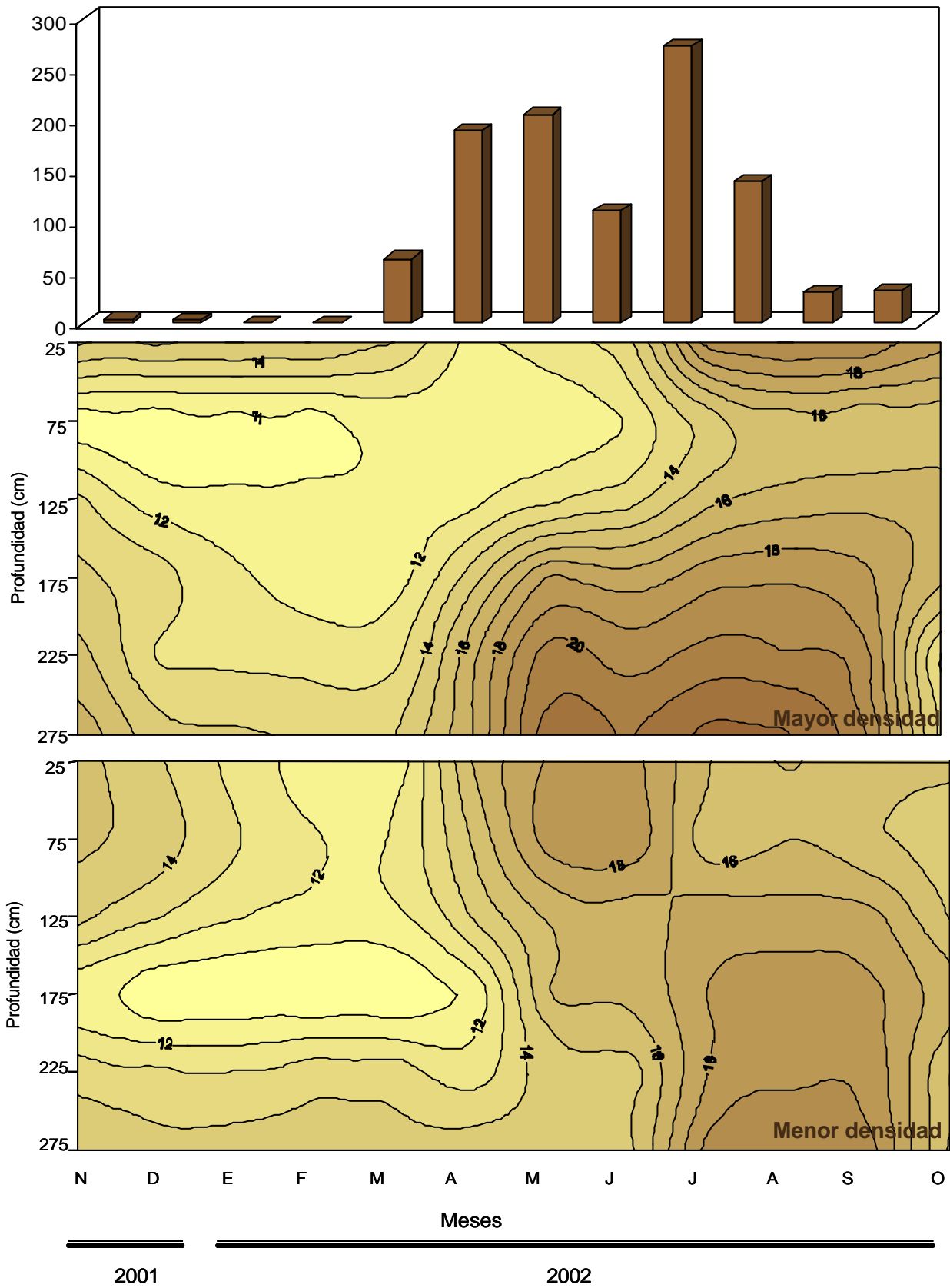


Figura 11. Distribución espacial y temporal de contenido de agua del suelo (% volumen) para Cajones 1 (mayor densidad) y Cajones 2 (menor densidad) y los aportes por precipitación (mm)

De la figura 11 se desprenden dos resultados importantes en relación al efecto del raleo sobre la disponibilidad de agua al año siguiente a su aplicación. A partir de ello, es posible observar que la cantidad de agua que llegó al suelo en la parcela de Cajones 1 (mayor densidad) fue menor a la que llegó a la parcela de menor densidad Cajones 2 (menor densidad).

De la misma forma se observa el efecto de la densidad sobre la cantidad de agua extraída desde el suelo. Es así, que en ambas parcelas se observa un efecto importante de las raíces que alcanzan los 2,5 metros de profundidad, produciendo un agotamiento de las reservas de agua en el suelo. Este efecto se acentúa temporalmente en el caso de Cajones 1 donde este lapso perdura por mayor tiempo. Este efecto atribuido a las características del sistema radicular de *Pinus radiata* ha sido estudiado por Teskey y Sheriff (1996) y Huber y Trecaman (2000a).

En términos particulares, de dichas mediciones se desprende que durante el año, el contenido de agua promedio del perfil osciló entre un mínimo de 12% para el mes de marzo y un 18-19% para el mes de agosto, en ambas parcelas. Esta diferencia, equivalente a 190,5 mm, se atribuye al curso anual de las precipitaciones y las condiciones meteorológicas que regulan la evaporación. Asimismo, se observó una disminución de la reserva de agua del suelo a partir del mes de septiembre, alcanzando su mayor déficit los meses de febrero y marzo. Por el contrario los mayores valores de humedad del suelo se produjeron en los meses de mayor precipitación (mayo a agosto).

En un análisis por profundidad, se observó que en ambas parcelas el curso anual del contenido de agua del suelo tuvo mayor oscilación cerca de la superficie hasta hacerse mínima a más de 200 cm de profundidad. Lo anterior tiene su causa en el hecho de que los estratos más superficiales están más afectados por las condiciones ambientales y, por otro lado, concentran la mayor cantidad de raíces.

Asimismo se observó una importante variación de humedad de en entre los 151 y los 200 cm de profundidad alcanzando 10,1% en el mes de marzo y 18,3% en el mes de agosto. El siguiente rango de profundidad que tuvo una importante variación fue 0 a 50 cm, logrando 11,3% en el mes de marzo y 16,1% en el mes de agosto.

En ambas parcelas, no se registraron gradientes nítidos de contenido de agua en el suelo a medida que se avanza en profundidad, como se han observado en plantaciones similares ubicadas en suelos arenosos, trumaos y rojo arcillosos (Huber y López, 1993; Huber y Trecaman, 2000b y 2002). Este particular comportamiento de la humedad del suelo debe estar provocado por algún horizonte de menor capacidad de retención de agua del suelo, el que se presentó entre los 60 y 100 cm en Cajones 1, y entre los 120 – 190 cm en Cajones 2. Sin embargo, en general se observó un aumento de la humedad del suelo en profundidad siendo esto influenciado por el aumento del contenido de arcilla. Esto se corrobora con los análisis de textura en terreno, los que permiten confirmar el aumento de la cantidad de este elemento a medida que avanza el perfil de suelo (anexo 6).

Las mismas diferencias en las propiedades del suelo, deben explicar el mayor gradiente de humedad en los primeros 50 cm del suelo de Cajones 1. Estas características de suelo, que aumentaron la capacidad de retención de agua permitieron el desarrollo de

una cubierta herbácea por más tiempo, que extrajo una cantidad adicional de agua. Esto es confirmado por la prueba de múltiples rangos, el cual permite expresar que existen diferencias significativas entre la parcela de Cajones 1 y Cajones 2, en los primeros 50 cm, por lo que las malezas estarían ejerciendo un efecto importante en el consumo de agua (Anexo 2e). La importancia del consumo de agua por parte de las malezas y su efecto sobre el balance hídrico de las plantaciones ya había sido observada por Huber y Trecaman (2000a y 2000b).

De esta manera, el efecto del raleo sobre la variabilidad espacial y temporal del contenido de agua del suelo, podría estar oculto o fuertemente regulado por la distinta capacidad de almacenamiento de agua útil. Así, las diferencias estadísticas registradas y presentadas en el anexo 5d, deben ser consideradas con precaución.

Otro punto importante encontrado, es que la capacidad de campo presentada por ambas parcelas es distinta, ya que en aquellos meses de invierno donde el agua satura los poros de almacenamiento y luego drena por 24 a 48 horas son para Cajones 1 entre un 16 y un 20% mientras que para Cajones 2 entre un 16 y un 18%, lo que implica una distinta velocidad de recarga del suelo o una leve diferencia en el tipo de suelo encontrado. En este punto la interceptación estaría jugando un papel importante ya que este componente de la redistribución retarda la saturación del suelo (Huber y Trecaman, 2000b).

4.4 Evapotranspiración neta y percolación

La evapotranspiración neta anual en Cajones 1 y Cajones 2 fue de 547,7 y 542,7 mm, respectivamente. Estos valores son similares entre sí, donde octubre fue el mes de mayor consumo por evapotranspiración. La cantidad de agua que participa en este componente es alta en comparación con estudios realizados en plantaciones semejantes ubicadas en zonas más lluviosas de Chile (Oyarzún y Huber, 1999) y en comparación con los resultados de Maragaño (2003), en un estudio paralelo a éste en plantaciones de *Pinus radiata* de mayor edad en la zona de secano.

El curso anual de este componente estuvo regulado por el régimen climático y por la disponibilidad de agua en el suelo. En los primeros tres meses del estudio, período que corresponde a meses de alta evaporación potencial, la parcela más densa evapotranspiró una mayor cantidad de agua. Esto se debió a que, al ser despreciables las precipitaciones y similar el contenido de agua del suelo (Anexo 4), la evapotranspiración neta dependía sólo de la intensidad con que esta última se extraía y que está en relación al número de árboles. Resultados semejantes encontraron Huber y Trecaman (2002), quienes valoran la densidad de la biomasa aérea bajo estas condiciones ambientales.

En el trimestre siguiente, cuando las condiciones aún eran favorables para la evapotranspiración, la parcela de menor densidad consumió una mayor cantidad de agua. Ello se produjo porque, estando dicha reserva casi agotada, recibió una mayor cantidad de ésta por su menor interceptación de dosel. La importancia de la cantidad de precipitación que efectivamente llega al suelo sobre la evapotranspiración neta, ya ha sido valorada por Huber y Trecaman (2002).

En los meses invernales, no se registró una notoria disminución de la evapotranspiración neta, como ha sucedido en estudios realizados en Collipulli y Valdivia (Huber y Trecaman, 2000b y Oyarzún y Huber, 1999). Esta situación se atribuye a que, existiendo suficiente agua en el suelo, la evaporación potencial es alta producto de una mayor temperatura y radiación solar en comparación con la zona sur de Chile (Huber e Iroumé, 2001). De todas maneras, la inusual cantidad e intensidad de lluvia en los meses de mayo, julio y agosto pudo haber provocado en algunos momentos escorrentía superficial, en cuyo caso la evapotranspiración estaría sobrestimada en dichos meses.

En el último trimestre, y en especial en el mes de octubre, cuando la demanda de vapor de agua por parte de la atmósfera se mantenía alta y existía una cantidad suficiente de agua en el suelo, la evapotranspiración neta aumentó en ambas parcelas, en especial en la parcela de mayor densidad.

Debido a la alternancia temporal de la evapotranspiración neta, sólo existieron 5 mm de diferencia entre ambas parcelas, señalando que no ocurrió una influencia de la densidad de la plantación en la evapotranspiración neta total anual. Por lo anterior no se registraron diferencias significativas en la cantidad de agua ni en su curso anual (Anexo 5b). Esta situación es similar a la encontrada por Huber y Trecaman (2002), quienes atribuyen este efecto a una mayor cantidad de agua disponible en la parcela de menor densidad.

Lo anterior se contrapone con estudios como los de Huber y López (1993) y Huber *et al.* (1998), en los cuales afirman una relación directa entre la densidad de un rodal y el consumo de agua por evapotranspiración. La explicación estaría dada por la menor disponibilidad de agua en el suelo y las condiciones meteorológicas imperantes en la época de estudio.

La variación temporal de la evapotranspiración durante el período de estudio, para ambas parcelas con la precipitación se observa en la figura 12. Esta variación temporal de la evapotranspiración neta, como se ha señalado, es distinta a la variación de la precipitación incidente. Los factores que determinan este fenómeno son la disponibilidad de agua edáfica, las pérdidas por interceptación y las condiciones meteorológicas. Este curso anual con un comportamiento bimodal ya había sido descrito en plantaciones de *Pinus radiata* por Huber y Trecaman (2002) en los Arenales de la VIII Región, que son suelos que se caracterizan por presentar una muy baja capacidad de agua aprovechable.

Considerando que existió un superávit de un 43% en las precipitaciones y que éstas se comportaron de una forma distinta a la esperada (concentrándose en otoño), y, es de suponer que en años con regímenes normales de precipitación esta situación se repita, o se vea acentuada aún más.

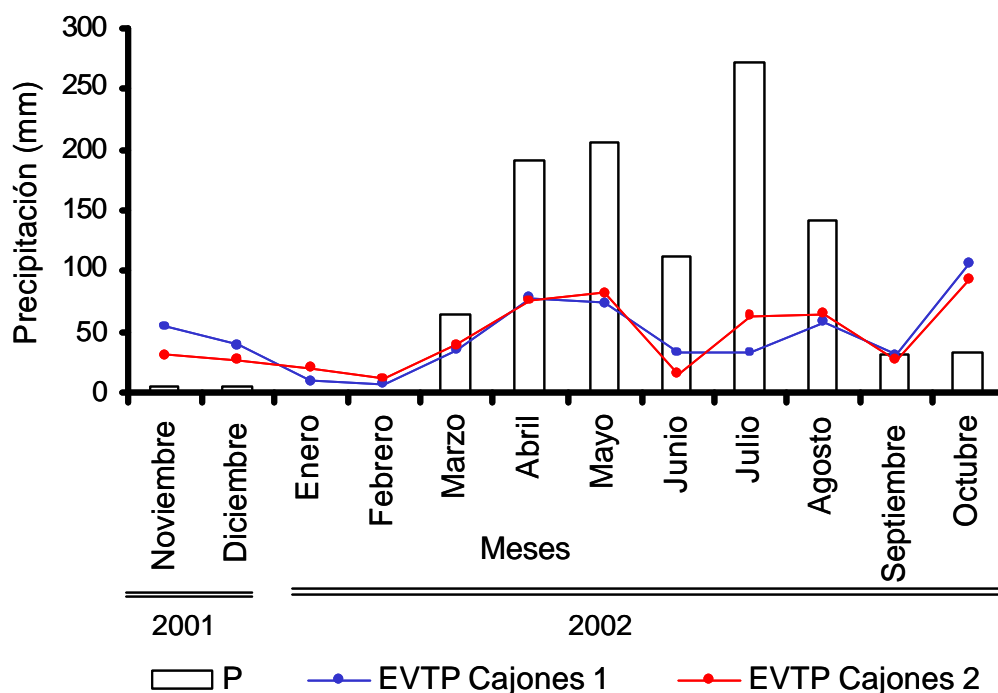


Figura 12. Variación temporal de la precipitación incidente (P) y evapotranspiración neta (EVTP) para ambas parcelas.

La percolación en tanto, como se observa en la figura 13, sólo se presentó en tres meses, correspondientes a los meses de junio, julio y agosto, alcanzando un total de 105 mm para Cajones 1 y 154 mm para Cajones 2, lo que corresponde al 10 y 15% de la precipitación total respectivamente.

Estos valores son bajos en relación a los registrados en otros ensayos realizados en zonas más lluviosas (Oyarzún y Huber, 1999), diferencia que se atribuye fundamentalmente a la reducida cantidad de agua que llegó al suelo producto de la menor precipitación y alta interceptación registrada en el presente estudio.

La percolación encontrada, coincide con la distribución temporal de la precipitación, produciéndose mayor percolación en meses de invierno y con un alto nivel de precipitación, existiendo un nivel mínimo de 111 mm de precipitación para que se produzca este fenómeno. En tanto, el curso anual fue similar en ambas parcelas y se caracterizó por iniciarse a fines de invierno, ya que fue necesaria una gran cantidad de lluvia para saturar el suelo debido a la alta interceptación. Una vez que las lluvias disminuyeron en septiembre, este componente cesó.

Asimismo, se observó una relación inversa entre la densidad de las plantaciones y la percolación, siendo un 50% mayor en la parcela más rala. Como durante estos meses no hubo diferencias de evapotranspiración éstas se atribuyen a las pérdidas de agua por interceptación. Este componente de la redistribución, junto con reducir la cantidad de agua disponible para percolar, retarda la saturación del suelo (Huber y Trecaman, 2000b).

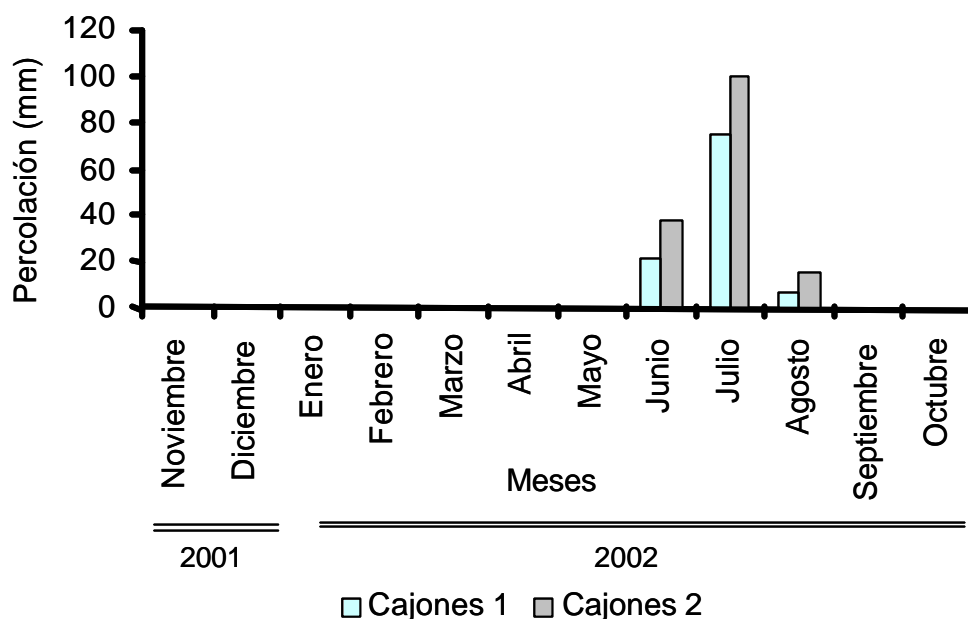


Figura 13. Variación temporal de la percolación para ambas situaciones, durante el período de estudio

La diferencia descrita no se observó al analizar estadísticamente la percolación, ya que no existen diferencias significativas a un nivel de significancia del 95%, entre Cajones 1 y Cajones 2, por lo que no se explica una diferencia de la percolación producto de la diferencia de densidad (Anexo 5d). Esta situación estaría dada, más que por un factor estadístico, por las características de la muestra, ya que al ser ésta de un tamaño muy reducido no permite una estimación adecuada.

Cabe destacar que, de acuerdo a la baja capacidad de almacenamiento de agua del suelo, y basándose en los resultados obtenidos por otros estudios en la zona de los Arenales en la VIII Región, se podría haber esperado una alta percolación en los meses de invierno (Huber y Trecaman, 2002). Tal situación no se produjo, lo que se atribuye a que las pérdidas de agua por interceptación se mantuvieron altas incluso en dichos meses.

4.5 Balance hídrico

En términos generales, el raleo afectó el balance hídrico de las plantaciones estudiadas, manifestándose esto en una disminución en la interceptación, aumento de la precipitación directa y neta, disminución del escurrimiento fustal, aumento de la percolación y una disminución no significativa de la evapotranspiración neta (Cuadro 3).

Las mayores diferencias se encontraron en la cantidad de agua involucrada en la precipitación directa y neta, seguida de las pérdidas de agua por interceptación y percolación (Cuadro 3). En relación a las últimas dos variables, aspectos como la mayor cobertura de copas en Cajones 1 y mayor precipitación directa en Cajones 2 producto del raleo, provocaron que dicha situación se manifieste.

Cuadro 3. Valores anuales (mm) de los componentes de la redistribución de las precipitaciones para Cajones 1 (Sin Raleo) y Cajones 2 (Con Raleo) y la diferencia producto del raleo realizado

	Pd	Ef	Pn	Ic	Percolación	Evapotranspiración neta
Sin Raleo	611.0	27.6	638.5	415.7	105.3	547.7
Con Raleo	681.4	18.7	700.1	354.2	154.2	542.7
Diferencia (C2-C1)	70.4	-8.9	61.6	-61.5	48.9	-5

Igualmente, este balance muestra que no existieron diferencias significativas en la evapotranspiración neta total anual ya que la parcela Cajones 1 evapotranspiró solo 5 mm menos que la parcela de Cajones 2. Este resultado permite afirmar que en estas zonas donde la principal limitante es la disponibilidad de agua del suelo, un raleo es insuficiente para aumentar la eficiencia de uso del agua y así mejorar la productividad de las plantaciones ubicadas en condiciones climáticas como las encontradas en este estudio, como lo plantean Huber y Trecaman (2002) en zonas más lluviosas. Esta práctica silvícola debe ser acompañada con manejos complementarios del suelo como es el caso del control de maleza, ya que su presencia influye en la disponibilidad de agua en los primeros 50 cm.

En tanto, la variación del contenido de agua del suelo desde el principio y hasta el final del período de estudio fue de $-14,5$ y $3,2$ mm para Cajones 1 y 2 respectivamente. Esto implica que la demanda de agua del suelo es más intensa en la parcela de mayor densidad, no así en la de menor densidad.

El manejo afectó el balance hídrico de la plantación, esto debido a que se alteró la porción de agua que llegó al suelo y, por lo tanto, la cantidad de agua utilizada en la transpiración. Así, un manejo adecuado de las características físicas del suelo y una evaluación correcta de las densidades utilizadas, permitirían una mayor ganancia de agua en el sistema.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la metodología de balance hídrico constituye una fórmula adecuada para comprender en su globalidad los complejos procesos del agua en las plantaciones forestales. Sus resultados, por tanto constituyen una información útil a la hora de planificar el establecimiento y evaluar el impacto de los manejos silvícolas sobre el recurso agua.

5. CONCLUSIONES

- ✓ El raleo en una plantación joven de *Pinus radiata* en la zona de secano interior afecta la distribución espacial y temporal del contenido de agua del suelo, las pérdidas de agua por intercepción y la percolación, no así la evapotranspiración neta.
- ✓ Las pérdidas de agua por intercepción fueron cercanas al 40% respecto a la precipitación total, encontrándose montos superiores en la parcela de mayor densidad y viceversa, siendo esta diferencia de 60 mm. En tanto, el escurrimiento fustal alcanzó cerca del 3% del total de las precipitaciones, siendo mayormente significativos los montos en la parcela de mayor densidad, alcanzando una diferencia de 9 mm. Debido a que el escurrimiento fustal alcanzó un valor muy bajo, la precipitación neta tuvo un comportamiento explicado principalmente por el curso anual de la precipitación directa, el que fue mayor en la parcela de menor densidad, alcanzando una diferencia de 70 mm.
- ✓ La disminución del contenido de humedad del suelo por consumo de las plantaciones de *Pinus radiata* alcanzó los 2,5 m de profundidad, siendo su efecto más intenso y prolongado en la parcela de mayor densidad.
- ✓ La evapotranspiración neta, no se vio afectada por el raleo realizado ya que la parcela de Cajones 1 evapotranspiró solo 5 mm menos que Cajones 2. Esta situación encontrada se debió principalmente a una mayor cantidad de agua disponible en la parcela de menor densidad, lo que hizo equiparar las tasas de evapotranspiración neta.
- ✓ La percolación alcanzó cerca del 15% respecto a la precipitación total, hallándose una diferencia cercan a los 49 mm, siendo mayor en la parcela de menor densidad, producto principalmente de las menores pérdidas de agua por intercepción, lo que incide directamente en la cantidad de agua disponible para percolar y el tiempo de saturación de éste.
- ✓ Se logró ratificar la hipótesis la que planteaba que el raleo de una plantación forestal joven altera los componentes del balance hídrico, especialmente tasa anual de intercepción y percolación, ya que la mayoría de los componentes del balance hídrico se vieron afectados, encontrándose un marcado cambio en los montos de intercepción y percolación.

6. BIBLOGRAFÍA

- Alvarez, M.; M., Giglio. 1997. Raleo de renovales en la Reserva Forestal Magallanes, efectos silvícolas e hidrológicos. Economía ambiental y su aplicación a la gestión de cuencas hidrográficas. Corporación Nacional Forestal, Departament for International Development, Environment Resources Management. 127- 145 p.
- Aussenac, G. 1968. Interception des précipitations par la couvert forestier. Annales des Sciences Forestières 25(3): 135-156.
- Bosch, J.M.; J.D., Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology 55: 3-23.
- Brechtel, H. 1983. Probleme beim Einsatz von Neutronensonde im Rahmen Hydrlogischer Messprogramme. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. Verlag Paul Parey. 301 p.
- Bréda, N.; A., Granier; G., Aussenac. 1994. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) Tree Physiology 15: 295-306.
- Calder, I.R. 1992. The hydrological impact of land-use change. In: Proceedings of the Conference on Priorities for water Resources allocation and Management. Natural Resources and Engeniers Advises Conference. Southampton. 91-101 pp.
- Crockford, R.H.; D.P., Richardson. 1990. Partitioning of rainfall in a Eucalypt forest and fine plantation in Southeastern Australia: I throughfall measurement in a Eucalypt forest: effect of method and species composition. Hydrological Processes (4): 131-144.
- Chu – San Lin, P. 1968. Einflüsse Verschiedener Pflanzenbestände auf den Wasserhaushalt in aimen Einzugsgebit. Ludwing – Maximilians – Universität zu München. 108p.
- Del Pozo L., A.; P., Del Canto. 1999. Áreas agro climáticas y sistemas productivos en la VII y VIII Regiones. INIA, Chillán. 116p.
- Donoso, C. 1994. Ecología Forestal. El bosque y su medio ambiente. Universitaria. Santiago. 369 p.
- Fahey, B. 1994. The effect of plantation forestry on water yield in New Zealand. New Zealand Forestry. 18 – 23 pp.
- Feller, M., C. 1981. Water Balance in *Eucalyptus regnans*, *E. obliqua*, and *Pinus radiata* forest in Victoria. Australian Forestry 44(3): 153-161.

- Fernández, F. 1996. Manual de climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación. Madrid, Síntesis (España). 285p.
- Ford, E.; J., Deans. 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young *Sitka spruce* plantation. *Journal of Applied Ecology* 15: 905-917.
- Fuentes, E.; H.J., Hernández. 1993. Cuantificación de los componentes del balance hídrico en tres cubiertas vegetacionales de la Cordillera de Nahuelbuta. Tesis Ing. Forestal, Santiago, Universidad de Chile, Fac. de Cs. Agrarias y Forestales. 81p.
- Fuenzalida, H. 1971. Climatología de Chile. Departamento de Geofísica y Geografía. Santiago, Universidad de Chile. 69p.
- Grimm, U.; 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.
- Honorato, R. 1993. Manual de edafología. Editorial Universitaria. Santiago (Chile). 196p.
- Huber, A.; C., Oyarzún. 1983. Precipitación neta e interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Bosque* 5(2): 13-19.
- Huber, A.; C., Oyarzún. 1984. Factores reguladores de la interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Bosque* 5(2): 59-64.
- Huber, A.; C., Oyarzún; A., Ellies. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque* 6(2): 74-82.
- Huber, A.; C., Oyarzún. 1990. Variaciones anuales en precipitación, escurrimiento e interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata* D. Don. *Turrialba* 42(2): 192-199.
- Huber, A. 1991. Redistribución de las precipitaciones y balance hídrico de un rodal de *Pinus radiata* y un bosque nativo del sur de Chile. *In: Gestión de recursos naturales. II Congreso Internacional. Valdivia, Chile. Tomo II. 565 – 569 pp.*
- Huber, A.; D., López. 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* D. Don, Valdivia, Chile. *Bosque* 14(2): 11-18.
- Huber, A.; P., Barriga; R., Trecaman. 1998. Efecto de la densidad de plantaciones de *Eucaliptus nitens* sobre el balance hídrico en la zona de Collipulli, IX Región (Chile). *Bosque* 19(1): 61-69.
- Huber, A.; F., García. 1999. Importancia de los factores meteorológicos en la transpiración potencial de *Pinus radiata*. *Φ Yton* 65: 143-152.

- Huber, A.; R., Trecaman. 2000a. Efecto de una plantación de *Pinus radiata* en la distribución espacial del contenido de agua del suelo. *Bosque* 21(1): 37-44.
- Huber, A.; R., Trecaman. 2000b. Efecto de la forestación en suelos rojos arcillosos sobre el recurso hídrico en la zona de Collipulli, IX Región (Chile). *Revista geográfica de Chile Terra Australis* 45: 49-60.
- Huber, A.; A., Iroumé. 2001. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology* 248: 78-92.
- Huber, A.; R., Trecaman. 2002. Efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, en la zona de los arenales VIII Región, Chile. *Bosque* 23(2): 43-49.
- Instituto Forestal (INFOR). 2001. Estadísticas forestales 2000. Santiago (Chile). Boletín Informativo 79. 65 p.
- Instituto de Investigación en Recursos Naturales (IREN). 1964. Proyecto aereofotogramétrico de Chile/O.E.A/B.I.D. Santiago, Chile. 391 pp.
- Iroumé, A.; A., Huber. 2000. Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque* 21(1): 45-56.
- Lee, R. 1980. *Forest Hydrology*. New York, Columbia University Press. 349 p.
- Lehmann, E.; H., D`Abrera. 1998. *Nonparametrics; statistical methods based on ranks*. San Francisco. Mc Graw-Hill. 433p.
- Liebsche, H. 1982. The hydrological cycle and the influence exerted upon it by man. *Applied Geography and Development* 26: 33-35.
- Linsley, R.; H., Kohler; J., Paulus. 1977. *Hidrología para Ingenieros*. 2ª Edición. Colombia, Mc. Graw-Hill. 386p.
- López, C.; C.M., Blanco. 1976. *Hidrología forestal*. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes, Publicaciones Madrid (España). v1 y v2. 134p.
- Maragaño B., M. 2003. Efecto de las plantaciones de *Pinus radiata* D.Don sobre el recurso agua en la localidad de Gualleco, zona de secano costero, VII Región. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 40p.
- Martínez, A.; J., Navarro. 1996. *Hidrología forestal. El ciclo hidrológico*. Valladolid (España). Universidad de Valladolid, Secretariado de publicaciones. 283p.

- Menzel, T. 1993. Redistribución de las precipitaciones en bosque Siempreverde, en la Provincia de Valdivia, X Región. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 87p.
- Monsalve, S., G. 1999. Hidrología en la ingeniería. 2ª ed., Alfaomega. Madrid (España). 382p.
- Moya, I. 2001. Balance hídrico en una plantación adulta de *Pinus radiata* D. Don, con distintos esquemas de manejo, en la zona de Valdivia, Décima Región. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 75p.
- Novoa, P. 1998. Estimación de la evapotranspiración actual en bosques. Teoría. Bosque 19(1): 111-121.
- Novoa, R. 1989. Mapa agroclimático de Chile. Santiago, Chile. 195p.
- Ovalle M., C.; A., Pozo. 1994. La agricultura del secano interior. INIA, Cauquenes (Chile). 234p.
- Oyarzún, C.; A., Huber; S., Vásquez. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* I: Redistribución de las precipitaciones. Terra 17(1): 35-44.
- Oyarzún, C.; A., Huber. 1999. Balance hídrico en plantaciones jóvenes *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. Bosque 6(1): 3-14.
- Pritchett, W. 1990. Suelos Forestales; Propiedades, conservación y mejoramiento. México, Limusa. 350p.
- Putuhuena, W., M.; I., Cordery. 1996. Estimation of interception capacity of the forest floor. Journal of Hydrology 180: 283-299.
- Roberts, J. 2001. Catchment and process studies in forest hydrology: Implications for indicators of sustainable forest management. Centre for Ecology and Hydrology. Wallingford, Oxfordshire. United Kingdom. 52p.
- Stoneman, G. 1993. Hydrological response to thinning a small jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest catchment. Journal of Hydrology (150): 393-407.
- Teskey, R., O.; D. W., Sheriff. 1996. Water use by *Pinus radiata* trees in a plantation. Tree Physiology 16: 273-279.
- Ulloa, C. 2000. Influencia del manejo sobre el balance hídrico en plantaciones de 14 años de edad en *Pinus radiata* D. Don en Los Ángeles, VIII Región. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 72p.
- Vertessy, R., A.; T. J., Hatton; R. G., Benyon; W. R., Dawes. 1995. Long-term growth and water balance predictions for a mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forest catchment subject to clear-felling and regeneration. Tree Physiology 16: 221-232.

- Van Dijk, A.; L. A., Bruijnzeel. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *Journal of Hydrology* 247: 230-238.
- Wilson, K., B.; P. J., Hanson; P. J., Mulholland; D. D., Baldocchi; S. D., Wullschleger. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology* 106: 153-168.
- Xiao, Q.; E., McPherson; S., Ustin; M., Grismer; J., Simpson. 2000. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes* 14: 763-784.
- Zinke, P. 1967. Forest Interception studies in the United States. *In*: Scooper, W.; H. Lull. *Forest Hydrology*. Belfast. 137-161 pp.

ANEXOS

Anexo 1

Abstract

Water balance changes by thinning in a young plantation of *Pinus radiata* D. Don, in San Javier, interior dry land, VII Region

The alteration of the components of water-balance by thinning was evaluated in San Javier, interior dry land (last of coastal range), VII Region. Starting from two selected stand of *Pinus radiata* established in 1997 thinning was made leaving a final density of 750 trees for hectare and a control of 1250 trees for hectare. The variables to quantify for the water-balance were measured in two parcels with the purpose of evaluate the immediate effect of thinning, during one year (October 2001 to October 2002).

The rainfall in that period was 1.054 mm, 30% higher (in average) than a normal year for this area. Interception losses oscillated between 39,4% and 33,6%, reaching this difference the 60 mm, meeting a direct relationship with the density of the stand. The soil water content average oscillated among 12,2% and 22,3%, having a similar temporary distribution to that of rainfall and being respectively at the end of the period of study with -14,3 and 3,2 mm of humidity. Percolation corresponds between a 10 and 14% of rainfall, having with density an inverse relationship. Net evapotranspiration of Cajones 1 reached 547,7 mm being very similar to Cajones 2 where it reached 542,7 mm, corresponding to near 50% of rainfall.

The final result of water-balance was decrease of the interception, increase of throughfall, decrease of the stemflow, increase in the soil water content and increase of the percolation. Net evapotranspiration, was not significant statistically.

Key words: Water balance; *Pinus radiata*; Thinning.

Anexo 2

Valores absolutos y relativos de la redistribución de las precipitaciones

Anexo 2a. Valores absolutos (mm) y relativos (%) de los componentes de la redistribución de las precipitaciones por mes, estación y año para la precipitación total (P), precipitación directa (Pd), escurrimiento fustal (Ef), precipitación neta (Pn) e Intercepción de copas (Ic), para Cajones 1

Período	P		Pd		Ef		Pn		Ic	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Noviembre	4,3	100	0,6	14,2	0,04	1,0	0,7	15,2	3,6	84,8
Diciembre	3,3	100	1,2	37,7	0,1	4,4	1,4	42,1	1,9	57,9
Enero 2002	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1 ^{er} Trimestre	7,6	100	1,8	24,3	0,2	2,4	2,0	26,8	5,5	73,2
Febrero	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Marzo	64,3	100	29,8	46,3	3,8	5,9	33,6	52,2	30,7	47,8
Abril	189,8	100	112,2	59,1	5,2	2,7	117,4	61,8	72,4	38,2
2 ^{do} Trimestre	254,1	100	142,0	55,9	9,0	3,5	151,0	59,4	103,1	40,6
Mayo	205,9	100	141,2	68,6	4,8	2,3	146,0	70,9	59,9	29,1
Junio	111,1	100	47,9	43,1	2,6	2,4	50,6	45,5	60,6	54,5
Julio	273,1	100	172,5	63,2	6,5	2,4	179,1	65,6	94,0	34,4
3 ^{er} Trimestre	590,1	100	361,7	61,3	13,9	2,4	375,7	63,7	214,4	36,3
Agosto	140,7	100	72,0	51,2	3,5	2,5	75,5	53,7	65,2	46,3
Septiembre	30,0	100	14,8	49,2	0,4	1,4	15,2	50,7	14,8	49,3
Octubre	31,9	100	18,6	58,4	0,6	1,9	19,2	60,3	12,7	39,7
4 ^{to} Trimestre	202,5	100	105,4	52,0	4,5	2,2	109,9	54,3	92,7	45,7
Total Anual	1054,3	100	611,0	58,0	27,6	2,6	638,5	60,6	415,7	39,4

Anexo 2b. Valores absolutos (mm) y relativos (%) de los componentes de la redistribución de las precipitaciones por mes, estación y año para la precipitación total (P), precipitación directa (Pd), escurrimiento fustal (Ef), precipitación neta (Pn) e Intercepción de copas (Ic), para Cajones 2

Período	P		Pd		Ef		Pn		Ic	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Noviembre	4,3	100	1,6	38,3	0,1	0,5	1,7	38,7	2,6	61,3
Diciembre	3,3	100	1,1	33,8	0,2	7,6	1,3	41,3	1,9	58,7
Enero 2002	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1 ^{er} Trimestre	7,6	100	2,7	36,3	0,3	3,5	3,0	39,9	4,5	60,1
Febrero	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Marzo	64,3	100	35,3	54,9	3,4	5,3	38,7	60,2	25,6	39,8
Abril	189,8	100	124,0	65,3	3,1	1,6	127,1	66,9	62,7	33,1
2 ^{do} Trimestre	254,1	100	159,3	62,7	6,5	2,6	165,8	65,2	88,3	34,8
Mayo	205,9	100	155,6	75,6	2,9	1,4	158,5	77,0	47,4	23,0
Junio	111,1	100	52,4	47,2	1,6	1,5	54,1	48,6	57,1	51,4
Julio	273,1	100	185,1	67,8	4,0	1,5	189,1	69,3	83,9	30,7
3 ^{er} Trimestre	590,1	100	393,1	66,6	8,5	1,4	401,7	68,1	188,4	31,9
Agosto	140,7	100	87,0	61,8	2,5	1,8	89,5	63,6	51,2	36,4
Septiembre	30,0	100	15,8	52,7	0,4	1,4	16,2	54,1	13,8	45,9
Octubre	31,9	100	23,4	73,5	0,5	1,6	23,9	75,1	8,0	24,9
4 ^{to} Trimestre	202,5	100	126,2	62,3	3,4	1,7	129,6	64,0	72,9	36,0
Total Anual	1054,3	100	681,4	64,6	18,7	1,8	700,1	66,4	354,2	33,6

Anexo 3

Variación temporal y espacial del contenido de agua del suelo

Anexo 3a. Variación temporal y espacial del contenido de agua del suelo (% de volumen) en la parcela de Cajones 1

Profundidad (cm)	Fecha de medición											
	Nov 2001	Dic 2001	Ene 2002	Feb 2002	Mar 2002	Abr 2002	May 2002	Jun 2002	Jul 2002	Ago 2002	Sep 2002	Oct 2002
0-50	16,8	14,4	14,2	13,9	13,9	16,8	21,7	20,9	22,3	22,1	20,4	13,6
51-100	15,4	12,8	12,8	12,7	12,6	16,7	20,6	19,3	20,4	20,0	19,6	12,6
101-150	14,3	13,6	12,2	11,5	11,4	14,5	18,3	17,4	18,7	18,9	18,3	16,3
151-200	13,3	11,4	11,3	11,4	11,4	11,6	12,7	13,5	15,7	16,4	16,7	16,7
201-250	10,4	10,3	10,6	10,4	11,4	11,6	11,6	12,0	14,3	15,4	15,1	15,3
251-300	15,2	15,3	15,1	15,1	14,1	11,7	12,6	13,6	19,6	20,1	20,0	18,4
Promedio	14,2	13,0	12,7	12,5	12,5	13,8	16,3	16,1	18,5	18,8	18,4	15,5
Total (mm)	427,0	389,0	381,0	375,0	374,0	414,5	487,5	483,5	555,0	564,5	550,5	464,5

Anexo 3b. Variación temporal y espacial del contenido de agua del suelo (% de volumen) en la parcela de Cajones 2

Profundidad (cm)	Fecha de medición											
	Nov 2001	Dic 2001	Ene 2002	Feb 2002	Mar 2002	Abr 2002	May 2002	Jun 2002	Jul 2002	Ago 2002	Sep 2002	Oct 2002
0-50	15,3	14,1	12,6	11,4	11,3	16,2	18,2	18,3	15,9	16,1	15,4	15,3
51-100	15,2	14,6	13,1	12,1	12,1	15,2	18,7	18,8	15,1	16,0	15,1	14,3
101-150	14,4	13,1	12,1	11,8	11,8	14,2	16,2	16,4	17,6	17,5	17,4	14,9
151-200	11,1	10,1	10,2	10,1	10,1	11,1	16,3	16,2	18,2	18,3	18,3	16,5
201-250	13,6	13,3	13,1	13,7	13,7	12,4	14,7	14,5	18,2	18,6	18,7	14,9
251-300	14,8	14,2	14,3	14,3	14,3	14,5	14,8	14,9	19,7	19,8	19,4	14,8
Promedio	14,1	13,2	12,6	12,2	12,2	13,9	16,5	16,5	17,5	17,7	17,4	15,1
Total (mm)	421,9	397,0	377,0	367,0	366,5	418,0	494,5	495,5	523,5	531,5	521,5	453,5

Anexo 4

Variación temporal de la evapotranspiración, interceptación y percolación

Anexo 4a. Valores mensuales, anuales y estacionales, de la evapotranspiración, intercepción y percolación en la parcela de Cajones 1.

Fecha de Medición	Precipitación (mm)	Intercepción (mm)	Percolación (mm)	Evapotranspiración neta (mm)
Noviembre	4,3	3,6	0,0	52,7
Diciembre	3,3	1,9	0,0	39,4
Enero 2002	0,0	0,0	0,0	8,0
<i>1^{er} Trimestre</i>	7,6	5,5	0,0	100,0
Febrero	0,0	0,0	0,0	6,0
Marzo	64,3	30,7	0,0	34,6
Abril	189,8	72,4	0,0	76,9
<i>2^{do} Trimestre</i>	254,1	103,1	0,0	117,5
Mayo	205,9	59,9	0,0	73,0
Junio	111,1	60,6	22,3	32,3
Julio	273,1	94,0	75,3	32,3
<i>3^{er} Trimestre</i>	590,1	214,4	97,6	137,6
Agosto	140,7	65,2	7,7	58,3
Septiembre	30,0	14,8	0,0	29,2
Octubre	31,9	12,7	0,0	105,2
<i>4^{to} Trimestre</i>	202,5	92,7	7,7	192,7
Total Anual	1.054,3	415,7	105,3	547,7

Anexo 4b. Valores mensuales, anuales y estacionales, de la evapotranspiración, intercepción y percolación en la parcela de Cajones 2.

Fecha de Medición	Precipitación (mm)	Intercepción (mm)	Percolación (mm)	Evapotranspiración neta (mm)
Noviembre	4,3	2,6	0,0	30,2
Diciembre	3,3	1,9	0,0	26,2
Enero 2002	0,0	0,0	0,0	20,0
<i>1^{er} Trimestre</i>	7,6	4,5	0,0	76,3
Febrero	0,0	0,0	0,0	10,0
Marzo	64,3	25,6	0,0	39,2
Abril	189,8	62,7	0,0	75,6
<i>2^{do} Trimestre</i>	254,1	88,3	0,0	124,8
Mayo	205,9	47,4	0,0	82,0
Junio	111,1	57,1	38,6	14,5
Julio	273,1	83,9	99,3	61,8
<i>3^{er} Trimestre</i>	590,1	188,4	137,9	158,3
Agosto	140,7	51,2	16,3	65,2
Septiembre	30,0	13,8	0,0	26,2
Octubre	31,9	8,0	0,0	91,9
<i>4^{to} Trimestre</i>	202,5	72,9	16,3	183,3
Total Anual	1.054,3	354,2	154,2	542,7

Anexo 5

Análisis estadístico

Anexo 5a. Prueba de normalidad de los datos para cada parcela de estudio

La prueba de Shapiro – Wilks se basa en comparar los valores de la curva de distribución normal con los valores de los datos. Se considera que los datos se ajustan a una distribución normal si $p > 0,05$, para un 95% de confianza.

Variable	Probabilidad	Distribución	Prueba
P	0,061	Normal	t-student
Pd _{c1}	0,019	No Normal	Wilcoxon
Pd _{c2}	0,024	No Normal	Wilcoxon
Ef _{c1}	0,044	No Normal	Wilcoxon
Ef _{c2}	0,043	No Normal	Wilcoxon
Pn _{c1}	0,021	No Normal	Wilcoxon
Pn _{c2}	0,026	No Normal	Wilcoxon
lc _{c1}	0,063	Normal	t-student
lc _{c2}	0,074	Normal	t-student
ΔW_{c1}	0,625	Normal	t-student
ΔW_{c2}	0,761	Normal	t-student
EVTP _{c1}	0,596	Normal	t-student
EVTP _{c2}	0,203	Normal	t-student

Anexo 5b. Pruebas paramétricas de la redistribución de las precipitaciones.

La prueba t y de Wilcoxon permiten reconocer diferencias significativas entre pares de media y medianas, respectivamente. La prueba t compara las medias de dos muestras y asume que valores de probabilidad mayores 0,05 no existen diferencias significativas entre las dos medias. La prueba de Wilcoxon determina si una mediana supuesta es razonable para un grupo de datos y asume que valores de probabilidad mayores a 0,05 no existen diferencias significativas entre las dos medianas.

Hipótesis	Prueba de t		Prueba de Wilcoxon	
	P	Decisión ($\alpha = 0.05$)	P	Decisión ($\alpha = 0.05$)
H ₀ : Pd _{c1} = Pd _{c2}	-	Rechaza	-	Rechaza
H ₁ : Pd _{c1} ≠ Pd _{c2}	0,006	Acepta	0,004	Acepta
H ₂ : Pd _{c1} = Pd _{c2}	0,003	Acepta	0,002	Acepta
H ₃ : Pd _{c1} ≥ Pd _{c2}	0,997	Rechaza	0,999	Rechaza
H ₀ : Ef _{c1} = Ef _{c2}	-	Rechaza	-	Rechaza
H ₁ : Ef _{c1} ≠ Ef _{c2}	0,021	Acepta	0,020	Acepta
H ₁ : Ef _{c1} = Ef _{c2}	0,990	Rechaza	0,993	Rechaza
H ₁ : Ef _{c1} ≥ Ef _{c2}	0,010	Acepta	0,010	Acepta
H ₀ : Pn _{c1} = Pn _{c2}	-	Rechaza	-	Rechaza
H ₁ : Pn _{c1} ≠ Pn _{c2}	0,005	Acepta	0,004	Acepta
H ₁ : Pn _{c1} = Pn _{c2}	0,003	Acepta	0,002	Acepta
H ₁ : Pn _{c1} ≥ Pn _{c2}	0,997	Rechaza	0,999	Rechaza
H ₀ : lc _{c1} = lc _{c2}	-	Rechaza	-	Rechaza
H ₁ : lc _{c1} ≠ lc _{c2}	0,005	Acepta	0,004	Acepta
H ₁ : lc _{c1} = lc _{c2}	0,997	Rechaza	0,999	Rechaza
H ₁ : lc _{c1} ≥ lc _{c2}	0,003	Acepta	0,002	Acepta

Anexo 5c. Pruebas paramétricas y no paramétricas para la evapotranspiración neta.

Hipótesis	Prueba de t-student		Prueba de Wilcoxon	
	P	Decisión (a = 0.05)	P	Decisión (a = 0.05)
$H_0: EVTP_{c1} = EVTP_{c2}$	-	Acepta	-	Acepta
$H_1: EVTP_{c1} \neq EVTP_{c2}$	0,923	Rechaza	0,910	Rechaza
$H_1: EVTP_{c1} = EVTP_{c2}$	0,538	Rechaza	0,575	Rechaza
$H_1: EVTP_{c1} \geq EVTP_{c2}$	0,462	Rechaza	0,455	Rechaza

Hipótesis	Prueba de Kolmogorov-Smirnov	
	P	Decisión (a = 0.05)
$H_0: EVTP_{c1}$	0,440	Rechaza
$H_1: EVTP_{c2}$	0,506	Rechaza

Anexo 5d. Análisis de varianza.

El análisis de varianza permite evaluar si existen diferencias significativas entre cada uno de los factores involucrados, teniendo en cuenta que con un $p > 0,05$ no existen diferencias significativas entre las medias.

Análisis de varianza para el contenido de humedad del suelo.

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Profundidad	256,65	11	22,3317	2,97	0,0015
Error	992,59	132	7,5196		
Total	1238,24	143			

Análisis de varianza para la percolación.

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Parcela	398,5	1	398,54	0,26	0,6393
Error	6220,9	4	1555,22		
Total	6619,4	5			

Anexo 5e. Prueba de múltiples rangos para el contenido de humedad del suelo con respecto a la variable profundidad.

Esta prueba de múltiples rangos permite evaluar cuales son las profundidades de ambos rodales que pertenecen al mismo grupo, es decir aquellas profundidades que tienen una media parecida, no presentan una diferencia significativa, para un 95% de confianza.

Profundidad	Cantidad	Media	Grupos
5	12	12,37	X
4	12	13,51	XX
10	12	13,87	XXX
9	12	14,78	XXX
11	12	14,95	XXX
7	12	15,01	XXX
8	12	15,02	XXX
3	12	15,45	XXXX
12	12	15,82	XXX
6	12	15,90	XXX
2	12	16,29	XX
1	12	17,58	X

Anexo 6
Descripción de Suelos

Anexo 6. Descripción de la serie de suelos encontrada en Cajones.

Este predio corresponde a la serie de suelos Pocillas que se describe en forma más detallada a continuación:

Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	Color
A	0-33	Franca	7,5 YR 4/4
AB	33-88	Franca arcillosa	7,5 YR 4/4
B	88-176 +	Franca arcillosa	7,5 YR 4/4

En este rodal se observa un suelo bastante profundo, sin limitaciones evidentes . Posee estructuras poliédricas a subpoliédricas y es de consistencia friable a plástico en profundidad. Se observa predominancia de horizonte B y concreciones en el horizonte B. Se advierte además la presencia de raíces hasta el horizonte B, encontrándose su mayor concentración en los primeros 40 cm.

Anexo 7

Calibración de la sonda de neutrones

La calibración de este instrumento se efectuó en base a la metodología propuesta por Brechtel (1983). Con este propósito se excavó una calicata en cada lugar de estudio con el fin de extraer muestras físicas del suelo.

Las muestras se extrajeron cada 25 cm hasta completar los 3 m de profundidad total del perfil en estudio, con cilindros de acero de 100 cm³, realizándose dos repeticiones como mínimo para lograr valores representativos del contenido de humedad.

Simultáneamente a la extracción de las muestras, se efectuaron mediciones del contenido de humedad con el dispositivo emisor de neutrones en los tubos de acceso más cercanos a cada calicata. Luego se procedió al análisis en laboratorio mediante el método gravimétrico, el cual se basa en el cálculo del contenido de humedad a través de la diferencia de peso luego de ser secado en un horno de alta temperatura.

Finalmente a cada valor promedio del contenido de humedad se le asigna su correspondiente lectura de neutrones, de acuerdo a la profundidad que representa, con lo que se obtuvo una ecuación, de regresión lineal simple, de la siguiente forma.

$$Y = a + bX$$

Donde:

Y : Contenido de humedad del suelo (% del volumen).

X : Número de neutrones lentos.

a,b : Coeficientes de la función.

Con esta ecuación es posible asignar a cada lectura realizada con la sonda de neutrones un valor de contenido de humedad en porcentaje de volumen.