

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente

EFFECTO DEL CAMBIO VEGETACIONAL EN LA PRODUCCION DE AGUA
UNA REVISION DE LITERATURA



JUAN HERNAN CABAS MONJE

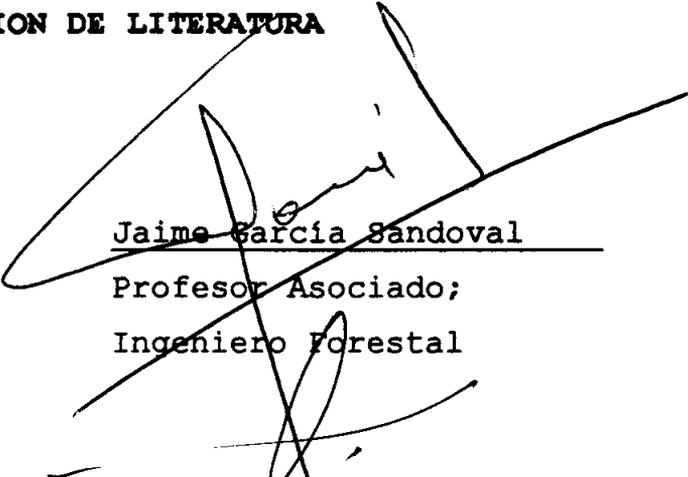
MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL.

CONCEPCION - CHILE
1999

EFECTO DEL CAMBIO VEGETACIONAL EN LA PRODUCCION DE AGUA UNA

REVISION DE LITERATURA

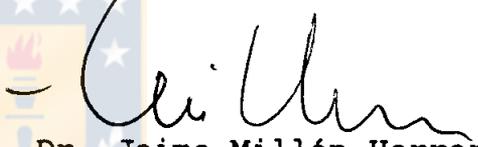
Profesor Asesor


Jaime García SandovalProfesor Asociado;
Ingeniero Forestal

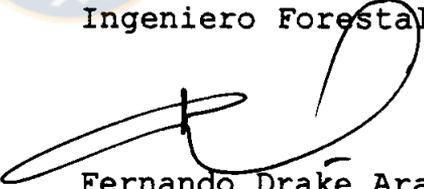
Profesor Asesor

Miguel Espinosa BancalariProfesor Titular;
Ingeniero Forestal;
Ph. D.

Director

Departamento Manejo de
Bosques y Medio Ambiente
Dr. Jaime Millán HerreraProfesor Asociado;
Ingeniero Forestal

Decano

Facultad de Ciencias
Forestales
Fernando Drake ArandaProfesor Asociado;
Ingeniero ForestalCalificación de la memoria de título:

Jaime García Sandoval : 90 puntos (Noventa puntos)

Miguel Espinosa Bancalari: 90 puntos (Noventa puntos)

INDICE DE MATERIAS

CAPITULOS	PAGINA
I INTRODUCCION.....	1
II EL CICLO HIDROLOGICO.....	2
2.1 Ciclo hidrológico.....	2
2.2 Precipitación.....	4
2.3 Intercepción.....	7
2.3.1 Factores biológicos.....	9
2.3.2 Factores físicos.....	13
2.4 Escurrimiento fustal.....	18
2.4.1 Densidad de rodal.....	18
2.4.2 Edad.....	19
2.4.3 Características del árbol.....	20
2.5 Precipitación directa.....	21
2.5.1 Densidad del rodal.....	21
2.5.2 Intensidad de las lluvias.....	22
2.5.3 Estacionalidad.....	22
2.6 Evapotranspiración.....	26
2.7 Transpiración.....	27
2.7.1 Atmosféricos.....	28
2.7.2 Fisiológicos y morfológicos....	31
2.7.3 Disponibilidad de agua en el suelo	38
2.7.4 Efecto de la densidad en la Transpiración de los rodales....	41
2.8 Evaporación.....	43

	2.9 Almacenamiento superficial.....	45
	2.10 Infiltración.....	45
	2.10.1 Textura y estructura del suelo..	45
	2.10.2 Compactación del suelo.....	48
	2.10.3 Contenido de humedad del suelo..	48
	2.11 Percolación.....	50
	2.12 Escorrentía.....	50
	2.13 Síntesis del ciclo hidrológico	55
III	EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS DE BOSQUES EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA.....	60
	3.1 Corta de árboles.....	60
	3.2 El fuego.....	67
	3.3 Plantación y regeneración de los Árboles.....	68
	3.4 Cambio de especie.....	70
	3.5 Cantidad de producción de agua..	73
	3.6 Síntesis del efecto del cambio Vegetacional en la producción de Agua.....	100
IV	CONCLUSIONES.....	102
V	RESUMEN.....	103
	SUMMARY.....	104
VI	BIBLIOGRAFIA.....	105

INDICE DE TABLAS

TABLA N°	PAGINA
<u>En el texto</u>	
1	Intercepción de la precipitación con diferente espaciamiento entre los árboles..... 13
2	Intercepción en un bosque tropical bajo distintos niveles de intercepción.. 14
3	Escurrimiento fustal en rodales de <i>Pinus radiata</i> D. Don con distinta densidad..... 19
4	Intercepción de la precipitación en especies latifoliadas y coníferas..... 23
5	Valores comparativos de consumo de agua anual y estacional de algunos árboles chilenos..... 30
6	Tasa típicas de transpiración para diversos bosques templados..... 33
7	Relación de la infiltración con la edad y permeabilidad en dos bosques distintos. 46
8	Tasa de infiltración para diferentes alteraciones de un suelo forestal..... 48

9	Relación entre superficie boscosa y escorrentía.....	55
10	Cambios en la producción de agua como Resultado de una alteración de la vegetación en cuencas hidrográficas.....	74



INDICE DE FIGURAS

FIGURA N°		PAGINA
<u>En el texto</u>		
1	Representación del ciclo hidrológico en el bosque.....	3
2	Producción de agua después de cambios En la cubierta de coníferas.....	85
3	Producción de agua después de cambios en la cubierta de eucaliptos.....	86
4	Producción de agua después de cambios en la cubierta de latifoliadas.....	87
5	Relación entre la cobertura del dosel (%) y el flujo de cauce (mm) para 6 cuencas en una zona de altas pp. para <i>Eucalyptus marginata</i>	91
6	Relaciones entre cobertura del dosel (%) y el flujo de cauce (mm) para 13 subcuencas de la cuenca Yarragil en la zona intermedia de lluvias en un bosque de <i>Eucalyptus marginata</i>	92
7	Cambio en la producción de agua después de una variación en la	

	cubierta de coníferas zona de altas precipitaciones.....	93
8	Cambio en la producción de agua después de una variación en la cubierta de coníferas. Zona intermedia de precipitaciones.....	94
9	Cambio en la producción de agua después de una variación en la cubierta de coníferas. Zona bajas precipitaciones..	95



I INTRODUCCIÓN

El agua constituye un elemento insustituible para la vida en la tierra. Todos los seres vivos además de estar constituidos en gran parte de agua, necesitan un suministro adecuado en calidad y cantidad de este recurso básico.

El agua es un recurso natural de gran importancia para el desarrollo humano debido a que directa o indirectamente, la actividad del hombre depende en mayor o menor grado de su abastecimiento oportuno. Este recurso tiene alternativas múltiples de uso, sin embargo, es necesario establecer una planificación adecuada, de manera de lograr su aprovechamiento integral, tratando de beneficiar lo más posible al hombre para lo cual es, necesario estudiar el ciclo hidrológico y su relación con la vegetación y su manejo.

Este trabajo analiza como influye el cambio vegetacional sobre la producción de agua, mediante una recopilación bibliográfica del ciclo hidrológico y de experiencias en cuencas hidrográficas.

II EL CICLO HIDROLOGICO

2.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico corresponde a un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación general del agua en la tierra. De acuerdo a esta idea, el ciclo abarca no solamente el movimiento y distribución del agua dentro de los continentes (escorrentía, infiltración, percolación), sino también el movimiento y circulación desde la hidrosfera a la atmósfera (evaporación), desde la atmósfera a la litosfera (precipitación) y desde esta última a la hidrosfera y atmósfera (escorrentía, evaporación, transpiración). Desde un punto de vista global, el ciclo hidrológico es un proceso continuo, pero que contiene elementos de azar y variables no continuas o discretas que se acentúan a medida que se consideran extensiones o territorios más reducidos (Salgado, 1989).

El movimiento permanente del agua en este ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: Primera, el sol, que proporciona la energía necesaria para elevar el agua desde el suelo mediante la evaporación. Segunda, la fuerza de gravedad, que permite que el agua en cuestión precipite y que una vez sobre la superficie vaya hacia las zonas más bajas (Custodio y Llama, 1976).

De acuerdo a Vásquez (1983), el ciclo hidrológico dentro del bosque puede ser esquematizado de la forma que se muestra en la Figura 1.

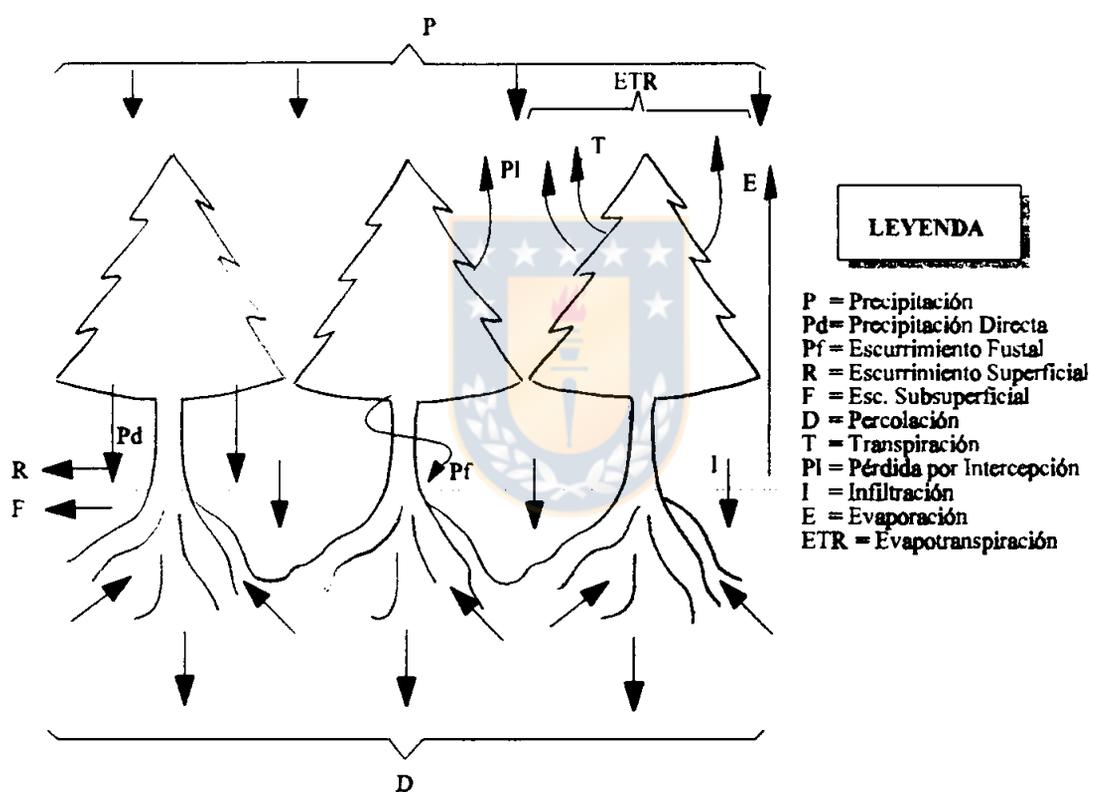


FIGURA 1 Representación del ciclo hidrológico en el bosque
Fuente : Aussenac (1970, citado por Vásquez 1983)

2.2. Precipitación (P)

Esta corresponde a la depositación de agua desde la atmósfera sobre una superficie, ya sea en forma sólida o líquida y es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico pudiendo calificarse como factor esencial de éste (Custodio y Llama, 1976).

Los aportes del agua al ecosistema ocurren principalmente por precipitación pluvial, aunque también pueden provenir de la nieve, la escarcha, el granizo, el rocío y la neblina (Daubenmire, 1979 citado por Vásquez, 1983).

La Nieve. De acuerdo a Donoso (1990), es el tipo de precipitación que surge cuando la condensación de vapor de agua en la atmósfera se produce bajo el punto de congelación y las condiciones generales de temperatura son tales que los cristales que se forman logran caer al suelo antes de derretirse.

La Escarcha. Es una capa de hielo por lo general transparente, suave, pero que usualmente contiene bolsas de aire; se forma en superficies expuestas por el congelamiento de agua super enfriadas que se ha depositado en forma de lluvia o llovizna (Linsley et al. 1988).

El Granizo. Es la precipitación en forma de bolsas irregulares de hielo que se produce por nubes convectivas, la mayoría de ellas de tipo Cúmulonimbus. Los granizos pueden ser esféricos, cónicos o de forma irregular y su diámetro varía entre 5 a más de 125 mm (Linsley et al. 1988).

El Rocío. Es la condensación del vapor de agua que se pone en contacto con superficies frías. Es un fenómeno que se produce especialmente en la noche cerca del amanecer, cuando las temperaturas son más bajas (Donoso, 1990).

La Neblina. Se produce cuando las partículas de vapor de agua son lo suficientemente pequeñas como para que puedan permanecer suspendidas en el aire, cerca o junto al suelo (Donoso, 1990).

Según FAO (1973), la precipitación desde la atmósfera a la superficie de la tierra y a las superficies de las aguas libres, en canales, lagos y ríos se producirá únicamente si se dan ciertas condiciones. Las tres condiciones necesarias para dicha precipitación son:

- Enfriamiento del aire de entrada hasta que está sobresaturado con vapor de agua.
- Condensación (conversión del vapor de agua en agua líquida en forma de gotas) lo que exige la presencia de núcleos diminutos.
- La coalescencia de gotitas de agua para formar partículas que sean suficientemente grandes para caer al suelo en forma de lluvia.

Se describe a la lluvia como gotas de agua mayores a 0,5 mm de diámetro, generalmente de 1 a 2 mm de diámetro (Salgado, 1989). Es principal forma de precipitación y fuente de abastecimiento para las plantas (Donoso, 1990).

De acuerdo a Wenger (1984), según los fenómenos meteorológicos que las originan, o las acompañan, existen tres tipos de precipitación de lluvia.

Precipitación conectiva. Originada por el calentamiento de las masas de aire próximas a la superficie de un suelo que ha recibido una fuerte insolación; suelen ser tormentas locales propias de la estación cálida.

Precipitación frontal. Con origen en el contacto de superficie de masas de aire (frentes) que poseen diferentes temperaturas y humedad. Estas últimas pueden ser de frente cálido o frío, o bien estar originadas por oclusión de un frente.

Precipitación orográfica. Este tipo de precipitación es característico de zonas montañosas y se originan debido al enfriamiento y posterior condensación de vapor de agua en las masas de aire como resultado de la ascensión por laderas montañosas.

En general, las precipitaciones pueden originarse de la combinación de los tipos de precipitaciones anteriormente descritos (Salgado, 1989).

De la precipitación total que ingresa a un ecosistema forestal una cantidad es retenida por las copas y troncos de los árboles (intercepción) y es reintegrada a la atmósfera por evaporación. Otra parte del agua llega al piso del bosque escurre de las hojas en donde se deposita durante la lluvia o pasa directamente a través del dosel para llegar al suelo (precipitación directa), mientras que

la restante llega a través de los troncos (escurrimiento fustal) (Oyarzún et al., 1985).

2.3. Intercepción (I)

La vegetación puede ejercer un efecto significativo sobre la cantidad de agua que llega al suelo por la intercepción que efectúa el follaje sobre una parte de la precipitación (Poore y Fries, 1987).

Existen dos definiciones de pérdida por intercepción, una considera la intercepción como la cantidad de lluvia retenida en la parte aérea de la vegetación (y subsecuentemente evaporada) y, la otra considera las pérdidas por intercepción como la porción de lluvia que es evaporada desde el dosel de las plantas independiente de la que podría ser normalmente transpirada, denominadas pérdidas de intercepción bruta y pérdida de intercepción neta, respectivamente (Aston, 1979).

La evaporación del agua de lluvia interceptada en la superficie de la vegetación se interpreta como agua perdida puesto que no está disponible para ser tomada por las raíces (Herwitz, 1985).

La pérdida por intercepción es un parámetro de gran importancia para cuantificar y predecir las consecuencias de los cambios en la cubierta vegetal sobre el balance hídrico (Gash et al. 1980; Pearce y Rowe, 1979, 1981).

Numerosos autores han mostrado que las pérdidas por intercepción son de gran importancia en la determinación de la producción de agua. Esta última, variará dependiendo de

la cubierta vegetal presente (Calder, 1976, 1977; Gash y Stewart, 1977; Stewart 1977; Pearce y Rowe, 1981).

La evaporación de la lluvia interceptada es una parte sustancial de la evaporación total desde áreas de bosque. En algunos casos las pérdidas por intercepción pueden llegar a más de 700 mm/año, representando casi el 70% de la evaporación total (Gash y Stewart 1977; Stewart 1979; Pearce et al. 1989).

Dentro del proceso de intercepción un parámetro de mucha importancia es "**la capacidad de almacenaje del dosel**" la cual se define como la cantidad de lluvia retenida por el dosel y disponible para ser evaporada hacia la atmósfera una vez que la lluvia termina (Rowe 1979, 1983). Se explica como la capacidad de las hojas de almacenar el agua retenida por la intercepción. Esta capacidad de almacenaje varía ampliamente entre especies de árboles y es una función de la cantidad y naturaleza de la superficie interceptante de la hoja (Aston, 1979; Calder, 1986).

Zinke (1967), citado por Aston (1979), encontró que los valores para la capacidad de almacenaje de intercepción están en un rango entre 0,25 a 9,14 mm por unidad de área vegetacional en bosque de Estados Unidos y Herwitz (1988), informa de un rango entre 2,2 y 8,3 mm, por unidad de área de vegetación para árboles del bosque húmedo tropical.

Las especies vegetales, especialmente los árboles, presentan distintos niveles de intercepción dependiendo del tipo de factor que los afecte pudiendo ser estos físicos, biológicos o ambos.

2.3.1. Factores Biológicos

Dentro de los factores biológicos que afectan los niveles de intercepción encontramos: Las características del árbol, la especie vegetal y la densidad del rodal.

a. Características del árbol.

Ramificación. En la intercepción, el tipo de ramificación horizontal (e.g, coníferas, *Nothofagus dombeyi* y *Nothofagus pumilio*) es más efectivo que la ramificación descendente (e.g, *Laurelia philippiana*, *Drimys winteri*) o ascendente (e.g, *Laurelia sempervirens*, *Podocarpus salignus*) (Donoso, 1990).

Forma de las hojas. La morfología de las hojas es de gran importancia en los niveles de intercepción. De acuerdo a Lull (1964), la forma que presentan las hojas de las latifoliadas induce a que las gotas de lluvia se junten para fluir y gotear hacia el suelo, en cambio, la morfología de las hojas de las coníferas permite que las gotas de lluvia permanezcan colgando desde las acículas en forma separada. Debido a esto, a pesar que en muchos casos las copas de las latifoliadas tienden a ser más densas, los niveles de intercepción son generalmente menores que los obtenidos en las coníferas.

Tipo de Hoja. En general las experiencias demuestran que las especies de hoja caduca (frondosas), interceptan un volumen de lluvia menor que las de hoja perenne (fundamentalmente coníferas) (López Cadenas de Llano, 1990).

Edad de los árboles. En los árboles, los valores de intercepción son máximos en la edad de culminación del crecimiento corriente, cuando la superficie foliar presenta el máximo desarrollo. Esto da a entender que en muchos casos los rodales viejos tienen menores pérdidas por intercepción (Molchanov 1960; citado por Raev 1986).

Lo anterior es corroborado por Brechtel (1962), citado por Huber (1983) y Forgeard et al. (1980), quienes señalan que un bosque de *Pinus sylvestris* de 16 años intercepta 32% otro de 20 años intercepta 50% y uno de 120 años entre 22% a 26%. Aussenac y Boulanget (1980), considerando sus datos y los obtenidos por otros autores, encontraron que en plantaciones francesas de *Pseudotsuga menziesii* la intercepción es alta a los 15 años incrementando ligeramente hacia los 50 años de edad. En *Fagus sylvatica* la intercepción promedió 15% a los 30 años, incrementando con la edad para registrar 20% - 25% a los 100 años.

b. Especie vegetal.

Coníferas y Latifoliadas. Raev (1986) indica que una recopilación de acerca de 100 estudios de intercepción expresa una tendencia clara: las coníferas retienen cerca de 2,0 a 2,5 veces más precipitación comparada con especies de latifoliadas deciduas.

Aussenac (1968), en un estudio comparativo realizado en Francia, encontró que la cantidad de agua necesaria para saturar las copas es mayor en *Pseudotsuga menziessi*, con 3,6 mm. (535 arb/ha), que en *Fagus sylvatica* con 1,7 mm (743 arb/ha). La pérdida por intercepción en ambas especies es 31% y 16%, respectivamente.

Poore y Fries (1978), señalan que en Australia un bosque de *Pinus radiata* D. Don de 35 años de edad interceptó 18,7%, en tanto que un bosque natural de *Eucalyptus rossi*, *Eucalyptus maculata* y *Eucalyptus dives*, interceptó un 10% de la precipitación. Aston (1979), en un estudio realizado en Estado Unidos, determinó una mayor capacidad de almacenaje del dosel de *Pinus radiata* D. Don. al compararlo con seis especies de eucaliptos.

En Chile, en un estudio comparativo realizado en Valdivia, Humber (1991), citado por Franke (1993), registró niveles de intercepción mayores en *Aextoxicum punctatum* (29,8% de la precipitación) que en *Pinus radiata* D. Don (15,3% de la precipitación). Aunque este resultado es contradictorio con los anteriormente expuesto no debería alterar la propuesta general que indica un mayor nivel de intercepción en las especies coníferas, debido, principalmente a la gran cantidad de resultados que avalan esta propuesta.

Tamaño de la Vegetación. Según Calder (1979), citado por Calder (1986), las tasas promedios de evaporación del agua interceptada por los árboles tienden a ser mucho mayores (entre 2 y 5 veces), que las obtenidas desde las vegetaciones más pequeñas, debido a que presentan una superficie menos uniforme al viento y son más eficientes en generar fuerzas convectivas, las cuales, en la mayoría de las condiciones meteorológicas, son el principal mecanismo responsable del transporte vertical de vapor de agua desde las hojas a la atmósfera. En pastos densos y hierbas que se aproximan a su crecimiento total, la pérdida por intercepción es casi igual a los árboles deciduos en floración total. Sin embargo, puesto que su estación de

crecimiento es corta, la intercepción anual total es considerablemente menor que la de los árboles deciduos (Lull, 1964).

Según Lee (1980), citado por Poore y Fries (1987), las diferentes clases de plantas se ubican en el siguiente orden, de acuerdo con las cantidades de agua que interceptan: pinos, eucaliptos, otros árboles latifoliados, rastrojo, pastizales.

De acuerdo a Kittredge (1984), las especies tolerantes a la sombra interceptan más que las intolerantes, las climax más que las pre-climax, y las mesofíticas más que las xerofíticas.

c. Densidad de los rodales.

De acuerdo a Chroust (1982), citado por Raev (1986), plantaciones de *Picea spp* de 17 años de edad retienen cerca de 45% de la precipitación anual, en tanto después de una reducción de la densidad desde 6600 arb/ha la intercepción es reducida a un 26%.

Teklehaimanot et al. (1991), para una experiencia realizada en Inglaterra en rodales de *Picea sitchensis* concluyen que "en rodales cerrados", debido a la mayor cantidad de árboles por hectárea, las pérdidas por intercepción son mayores, a pesar que en un rodal menos denso cada árbol individualmente intercepta mayor cantidad de agua. Esto se debería al incremento de la ventilación dentro del rodal y el cambio de la turbulencia en el dosel (Tabla 1).

TABLA 1 Intercepción de la precipitación con diferente espaciamento de los árboles

Espaciamento (m)	I (mm)	I (%)	It (m ³)
2	7.27	33	0.025
4	5.87	24	0.094
6	3.61	15	0.130
8	2.32	9	0.149

Fuente: Teklehaimanot et al. (1991).

It= Pérdida de intercepción

2.3.2 Factores Físicos. Los factores físicos que afectan los niveles de intercepción son: La intensidad y duración de las lluvias, la estacionalidad, la radiación y la temperatura.

a.- Intensidad y duración de lluvias. Vásquez (1983), plantea que las pérdidas en valores absolutos se incrementan con un aumento de la intensidad y duración de las precipitaciones, aunque disminuyen su participación relativa.

En los aguaceros más pequeños la cantidad de agua interceptada puede alcanzar prácticamente la totalidad del agua caída, quedando retenida entre las copas y troncos de los árboles de donde se evapora directamente a la atmósfera sin llegar nunca al suelo. Según aumenta la cantidad de agua caída también va siendo mayor la lluvia interceptada, hasta alcanzar un valor máximo a partir del cual la cantidad interceptada se hace más constante, sin aumentar con la precipitación disminuyendo gradualmente el

porcentaje interceptado respecto a la lluvia (González de Tango et al. 1988). La interceptación generalmente disminuye con el incremento de la intensidad y duración de las lluvias, ya que a medida que aumenta la duración de éstas, las copas se saturan con agua, lo que hace aumentar la precipitación directa y con ello disminuir las pérdidas por interceptación (Huber y Oyarzún, 1984).

Según mediciones hechas en Valdivia por Huber et al. (1983), en el bosque de *Pinus radiata* D. Don de 16 años de edad, las precipitaciones son retenidas casi en su totalidad cuando los aportes no superan los 30 mm con intensidades de 3 mm/día, en tanto que precipitaciones de 80mm mensuales con intensidad de más de 14 mm/día alcanzan rápidamente el suelo mediante la precipitación directa con valores de más de 80% de la precipitación total. En tanto Jackson (1975), midió en un bosque tropical de Australia, los niveles de interceptación para diferentes cantidades de precipitación (Tabla 2).

TABLA 2 Interceptación en un bosque tropical bajo distintos niveles de precipitación.

Precipitación (mm)	1	2	5	10	15	20
Interceptación (mm)	0.8	1.2	1.7	2.1	2.3	2.4
Interceptación (%)	85	61	35	21	15	12

Fuente: Jackson (1975).

b.- Estacionalidad. De acuerdo a Kittredge (1948), las pérdidas porcentuales por interceptación tienden a ser

menores en invierno que en verano; estas diferencias estacionales en la intercepción son mayores para especies deciduas alcanzando una diferencia promedio cercano al 50% de la precipitación total.

El efecto estacional es evidente en las pérdidas por intercepción de un bosque de *Nothofagus sp.*, con promedios de 22% de intercepción de la precipitación en el invierno y 35% en el verano (Rowe, 1983). Aussenac y Boulangeat (1980) encontraron en Francia intercepciones entre el invierno y el verano de 15% y 7% para *Fagus sylvatica* y *Pseudotsuga menziesii*, respectivamente.

Según Vásquez (1983), los mayores porcentajes de intercepción producidos en verano y primavera en rodales de *Pinus radiata* D. Don. Cercanos a Valdivia se debe a menores intensidades de precipitación, lo que unido a temperaturas elevadas favorecen la rápida evaporación del agua interceptada. En tanto en invierno se produce un menor porcentaje de intercepción, producto principalmente, de la baja evaporación desde las copas de los árboles y la alta humedad relativa del aire.

c.- Temperatura y radiación. Es normal asociar altas temperaturas con incrementos desde el dosel, esto es debido a que las temperaturas altas son causadas usualmente por la entrada de gran cantidad de radiación y bajo estas condiciones existe un abundante abastecimiento de energía disponible para la evaporación.

Cooper y Lockwood (1987), usando un modelo para estudiar las diferentes capas del dosel de pinos, muestran que si la

radiación entrante es tomada en niveles bajos, lo cual está asociado con las lluvias de zonas templadas, las pérdidas por interceptación tienden a decrecer con la disminución de la temperatura. Si otras condiciones meteorológicas permanecen constantes, el incremento en la temperatura se asocia con un aumento en la tendencia a almacenar, por un largo tiempo, el agua interceptada en las partes bajas del dosel, en tanto que la parte superior del dosel es secado en forma relativamente rápida (Lockwood, 1990).

Morton (1984) señala que la evaporación del dosel húmedo (agua interceptada) puede exceder en gran cantidad la energía radiante neta y que las pérdidas por interceptación dependen principalmente de la frecuencia y duración de las lluvias.

Los trabajos desarrollados por Stewart (1977) y Singh y Szeicz (1979), para estudiar la evaporación del agua interceptada desde el dosel, indican que al menos en las regiones templadas esta evaporación del dosel no es controlada, predominantemente, por la entrada de energía radiante; más bien, confirman la hipótesis de Rutter (1967), citada por Pearce et al. (1980), en cuanto a que el dosel húmedo actúa como un vertedero (alcantarilla, sumidero) para la energía adventicia, la cual es derivada desde la energía calórica del aire que pasa sobre el bosque o desde el calor almacenado en el dosel y el bosque mismo.

Puesto que la energía usada en evaporar el agua interceptada es entregada en gran escala por advección más que por entrada de energía radiante, Pearce et al. (1980), indican que las tasas de evaporación desde el dosel húmedo

del bosque durante la noche no tendran, necesariamente, gran diferencia con las ocurridas en horas de radiación neta positiva. Al existir altas tasas de evaporación en la noche aumenta la importancia de la intercepción en el balance de agua en las áreas con altas precipitaciones, puesto que la evaporación rápida del agua interceptada podrá entonces ocurrir durante las 24 horas del día, en tanto que la transpiración, generalmente ocurre durante las horas de luz. Las pérdidas por intercepción durante las horas de oscuridad son, por lo tanto, una pérdida total en el balance de agua porque la transpiración normalmente no ocurre durante el período sin luz (Pearce et al. 1980).

Según Pearce et al. (1980), los análisis de las pérdidas por intercepción pueden tener serios errores en zonas que presentan precipitaciones grandes donde las variaciones en frecuencia y en cantidad de lluvias son pequeñas, si no se toman en cuenta las pérdidas por intercepción ocurridas durante la noche (donde no ocurre la transpiración compensatoria). El error podría ser especialmente serio donde una mayor proporción de la lluvia ocurre en la noche.

En un estudio realizado por estos autores en un bosque mixto siempreverde, donde la intercepción en la noche fue 40-50% de la intercepción bruta total, 50-60% de la intercepción neta y 30% de la evaporación total, la evaporación media del dosel húmedo estimada para la noche registró 0,37 mm/h lo que no fue muy diferente al obtenido para el día. Esta similitud en los registros, indicaría que la evaporación desde el dosel húmedo se deriva de la energía de advección y no por radiación. La pérdida por intercepción neta podría aumentar con el aumento de la

cantidad y duración de las lluvias en la noche. Probablemente, en muchos climas de alta pluviosidad, donde más de la mitad de las lluvias ocurren en la noche, la importancia de la interceptación en las pérdidas evaporativas y en la magnitud de las pérdidas netas es mucho mayor que para otras áreas donde la lluvia depende casi completamente de actividades convectivas en el día.

2.4 Escurrimiento Fustal (S)

Según Huber et al. (1985), el escurrimiento fustal es aquella parte de la precipitación que es interceptada por el dosel y que alcanza el suelo escurriendo por el fuste. A pesar que el escurrimiento fustal constituye un porcentaje pequeño de la precipitación (aproximadamente 3%), tiene un efecto muy grande en la calidad del agua que entra en el suelo (Johnson, 1990).

Los niveles de escurrimiento fustal dependen de factores tales como: la densidad del rodal y las características del árbol.

2.4.1 Densidad del Rodal. A nivel de rodal la densidad juega un rol importante en la cantidad de agua que escurre por los fustes. De acuerdo a Oyarzún et al. (1985), en un estudio realizado en Valdivia, rodales de *Pinus radiata* D. Don de mayor densidad alcanzan un mayor porcentaje de escurrimiento fustal total, debido al mayor número de árboles por hectárea, en tanto que en rodales menos densos el escurrimiento fustal es menor, debido principalmente, al aumento del área de interceptación del corte transversal de las copas (Tabla 3).

Análogamente, Aussenac y Boulangeat (1980), encontraron una relación similar a la observada por Oyarzún et al. (1985), en rodales jóvenes de *Pseudotsuga menziesii* de 23 y 17 años de edad con distintas densidades, desarrollados en Francia. Para esta especie la densidad disminuye el escurrimiento fustal por árbol. Según Ford y Deans (1978), citados por Teklehaimanot et al. (1990), la protección del área de copas se correlaciona positivamente con el escurrimiento fustal en rodales de *Picea sitchensis*.

TABLA 3 Escurrimiento fustal(s) en rodales *Pinus radiata* D. Don con distinta densidad

Plantación	Edad(años)	Densidad (arb/ha)	S(%)	Precipitación para iniciar S
Adulto	26	733	12	5mm
Tradicional	9	1392	21	1.3mm
Silvopastoreo	9	442	12	0.8mm

Fuente: Oyarzún et al. 1985

2.4.2 Edad. De acuerdo a Oyarzún et al. (1985), en rodales jóvenes de *Pinus radiata* D. Don el escurrimiento fustal es alto, debido a la disposición geométrica de las ramas y el tamaño de las copas. El tiempo de inicio del escurrimiento fustal es más corto en rodales jóvenes, ya que su corteza lisa y delgada se impregna rápidamente, en contraste con la corteza gruesa, irregular y absorbente de los rodales maduros. Además la cantidad de precipitación necesaria para comenzar el escurrimiento fustal es menor en rodales jóvenes.

La tasa de crecimiento de los árboles también puede afectar el escurrimiento fustal puesto que árboles de rápido crecimiento tienden a tener corteza lisa y con pocas epífitas (Fangi y Lugo 1985; citado por Scatena 1990).

2.4.3 Características del árbol. Las características morfológicas de los árboles juegan un papel fundamental en los niveles de escurrimiento fustal. Donoso (1990), indica que el escurrimiento fustal varía según la forma de las ramas, tipo de corteza y altura del árbol dentro del rodal. Dentro de estos factores se observa como el más importante el tipo de corteza. Scatena (1990), indica que en un bosque tropical de Puerto Rico el escurrimiento fustal fue mayor en árboles con corteza lisa y en los doseles anchos con forma de embudo, en tanto que fue menor en troncos ásperos y articulados con presencia de epífitas y trepadoras, puesto que éstas incrementan el área total disponible para retención del agua.

La corteza de los árboles tiene gran importancia en un medio ambiente de bosque tropical lluvioso, ya que detiene el agua de lluvia interceptada bajo condiciones de lluvia intensa. En algunos doseles tropicales grandes que han sido completamente mojados, el almacenaje de agua en la corteza es de 30 - 50% (Herwitz, 1985).

Rowe (1979), en un estudio realizado en Nueva Zelanda en bosque de *Nothofagus sp.*, encontró que los factores que influyeron en los niveles de escurrimiento fustal fueron la corteza rugosa (agrietada) de los árboles maduros y los abundantes musgos y líquenes presentes en los árboles jóvenes. Feller (1981), observó que en algunas especies de

eucaliptos, cuyos troncos tenían pedazos de su corteza despegada y colgando, el agua escurría hacia sus extremos, para luego caer al agua goteando. De este modo, algo de escurrimiento fustal puede convertirse en precipitación directa.

2.5. Precipitación Directa (PD)

Se define la precipitación directa como aquella parte de la precipitación que llega al piso del bosque goteando desde las hojas o ramas o pasando directamente a través del dosel para llegar al suelo (Oyarzún et al. 1985)

Los valores de precipitación directa de un rodal, en relación al campo abierto, fluctúan entre un 40% y un 90% según diferentes autores (e.g. Aussenac 1970 y Aussenac y Boulangeat 1980), dependiendo principalmente de la densidad del rodal, intensidad y duración de la lluvia, edad del rodal y la especie vegetal.

2.5.1 Densidad del Rodal. Según Aussenac y Boulangeat (1980), al aumentar la densidad en rodales de *Pseudotsuga menziessii* disminuye la precipitación directa, la que es compensada por un aumento del escurrimiento fustal. Relaciones similares encontraron Vásquez (1983) y Johnson (1990) en dos rodales de *Pinus radiata* D. Don de distinta densidad y en rodales de *Picea sitchensis*, respectivamente. En tanto que, Lostau et al. (1992), no encontraron diferencias significativas en la precipitación directa en un rodal de *Pinus pinaster* en relación con la distancia entre los fustes.

2.5.2 Intensidad y duración de las lluvias. La lluvia juega un papel importante en los niveles de precipitación directa. Según Preble y Stirk (1980), citados por Vásquez (1983), el porcentaje de precipitación directa aumenta con el incremento total de la precipitación en especial cuando éstas superan los 80 mm semanales, pudiendo alcanzar valores muy similares a la precipitación total. Scatena (1990), señala que en un bosque tropical las variaciones producidas en la magnitud y frecuencia de las lluvias tienen una mayor influencia en la precipitación directa que las diferencia entre los bosques.

A medida que aumenta la duración de las lluvias las copas se saturan con agua lo que hace aumentar la precipitación (Vásquez (1983)).

2.5.3 Estacionalidad. Un factor muy relacionado con la intensidad y duración de las precipitaciones es la estacionalidad. En invierno la precipitación directa tiende a ser más alta que en el verano, debido a las bajas tasas de evaporación del agua almacenada en el dosel, lo que causa menores pérdidas por intercepción y alta precipitación directa. Lo anterior concuerda con Rowe (1979), quién determinó en un estudio realizado en Nueva Zelanda para un período de tres años de registros, que la lluvia precipitada directamente promedio 77% y 68% para invierno y verano, respectivamente. En cuanto a la edad de los rodales, al comparar la proporción de precipitación directa y escurrimiento fustal en el bosque de Kirkklon y otros bosques Británicos Johnson (1990), estableció que la precipitación directa aumentó con la edad, mientras que el escurrimiento fustal disminuyó.

En la Tabla 4 se entregan valores comparativos de intercepción, escurrimiento fustal y precipitación directa expresados en porcentaje para coníferas y latifoliadas. Se observa que en general, las especies coníferas presentan mayores niveles de intercepción y menores niveles de precipitación directa que las latifoliadas.

TABLA 4 Intercepción de la precipitación en especies latifoliadas y coníferas.

Coníferas	Edad	Arb/ha	I (%)	S (%)	PD (%)	P (mm)	Referencia
<i>Pinus radiata</i>	26	733	14	12	74	2000	Oyarzún et al.(1983)
	9	1392	18	21	61	2000	
	9	443	9	12	76	2000	
	40	670	25.5	1	73.5	1148	Feller (1981)
	35		18.7				Rowe (1983)
	17		39				Poore y fries (1987)
			15.3	10.8	73.9	1969	Hubert (1991) citado por Francke (1993)
<i>Pinus silvestris</i>	44	1870	42.4			493	Gash et al.(1980)
	28	1520	30	2.4	67.6	816	Aussenac (1968)
	20	2190	50.8			826	
<i>Pinus nigra</i>	20	1850	50.4			820	Forgeard et al.(1980)
			30.8				Reav(1986)
			47.3	0.2	52.5		Forgeard et al (1980)
<i>Pinus murrayana</i>	20	1750	53.4			826	Forgeard et al.(1980)
<i>Pinus caribea</i>	6	1667	6.6	3			Forgeard et al.(1980)
<i>Pinus pinea</i>			27.6	2.3	70.1		Forgeard et al.(1980)
<i>Pinus ponderosa</i>	Maduro		40				Kittredge (1948)
	Maduro		27				
	Maduro		22				
	Joven		18				
<i>Pinus strobus</i>	Maduro		24				Mahendrappa(1990)
<i>Pinus strobus</i>	Maduro		30.7	5.3	65		Mahendrappa (1990)
	40		37				Kittredge (1948)
<i>Pinus pinaster</i>	18	888	12.6-21	1-6	77-83	920	Kittredge (1948)
<i>Pinus resinosa</i>			28.3	0.7	69		Mahendrappa (1990)

Coníferas	Edad	Arb/ha	I(%)	S(%)	PD(%)	P(mm)	Referencia
<i>Pinus rigida</i>	24		18.5				Kim y Woo (1988)
<i>Pinus wallichiana</i>	20		21.02	2.73	76.23	1327	Singh (1988)
<i>Cedrus atlantica</i>	45		47			453	González de Tamago (1987)
<i>Cedrus deodara</i>	35		25.2 22.8	2.9	71.8	1850	Singh et al., (1984) Reav (1986)
<i>Picea sitchensis</i>	50		28	3	69	2200	Johnson (1990)
	33	4250	26.6			1795	Gash et al. (1980)
	29	3600	31.7			802	
	20	2580	60.2 38			826 1439	Forgerad et al., (1980) Anderson et al., (1991)
<i>Picea abies</i>	30	2160	34	2	64	816	Aussenac (1968)
	33	1280	59.3			826	Aussenac (1968)
			23-38	2.6-4.2	57.5-58.2		
			39.8	1.4	58.8		
			47.8	0.13	52		
		575	34.2	0.5	65.3	1400	Viville et al. (1993)
<i>Picea rubens</i>			21.7	2.3	76		Mahendrappa (1990)
<i>Picea glauca</i>			20.6	6.4	7.3		Mahendrappa (1990)
<i>Tsuga sp.</i>			54				Forgeard et al. (1980)
	Maduro		48				Kittredge et al. (1948)
<i>Tsuga sp.</i>	Maduro		38				Kittredge (1948)
	Maduro		34				
	Maduro		31				
	Maduro		13				
<i>Abies grandis</i>	35	620	42	1	57	816	Aussenac (1968)
	20	2290	50.2				Forgeard et al. (1980)
<i>Abies balsamea</i>			32				Prevost (1987)
			16.5	3.5	75		Mahendrappa (1990)
<i>Larix europeae</i>			18.3				Reav (1986)
<i>Pseudotsuga mezesii</i>			32.3-36.4	6.2-15	48.6-60		Forgeard et al. (1980)
			35-37	4-17	46-62		
	25		43				Kittredge (1948)
	Maduro		34				
	47		28				Langford (1978)
	20	2530	51.2			826	Forgeard et al. (1980)

Coníferas	Edad	Arb/ha	I (%)	S (%)	PD (%)	P (mm)	Referencia
<i>Sequoia sempervirens</i>	47	39					Forgeard et al. (1980)
<i>Eucalyptus regnans</i>	40	550	18	7	74.5	1598	Feller (1981)
			22-26	2-3			Poore y Fries (1987)
	Maduro		28.2	4.3	72-76		
	40		17.7	5.3	72.7		
			16.8-18.7				
<i>Eucalyptus obliqua</i>	40	830	15	0.5	84.5	1148	Feller (1981)
<i>Eucalyptus melanophloia</i>			11	0.2	88		Poore y Fries (1987)
<i>Eucalyptus signata</i>			22	13	65		Poore y Fries (1987)
<i>Eucalyptus umbra</i>			22	3	75		Poore y Fries (1987)
<i>Eucalyptus saligna</i>	6	1667	12.2	4.2	83.6	1280	Poore y Fries (1987)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	7-12	1111	14.63	4.53	80.84	600	Poore y Fries (1987)
	2	870	5.3	1.8	92.9	600	
	3	870	4.6	1.3	94.1	600	
	4	870	7.1	2.0	90.9	600	
<i>Eucalyptus sp</i>	5	1068	22.9			1000	Poore y Fries (1987) George (1980)
	6	1058	10.6			1600	
<i>Nothofagus sp.</i>			25.5	1.5	73	2074	Rowe (1979)
<i>Aextoxicum punctatum</i>			29.8	1.2	73.9	2460	Huber (1991) citado por Franke(1993)
<i>Fagus selvatica</i>	30	1300	17	7.1	75.9	724	Aussenac (1968)
	10	6000	32.1			820	Forgeard et al. (1980)
	20-30	3240	35.4			820	
	40-50	4900	19			820	
	50-60	2700	18.2			820	
	70-80	800	28.3			820	
	110-120	300	33.4			820	
	120-140	200	30.3			820	
20-40		12	4	84	800	Neal et al. (1991)	
<i>Quercus sp.</i>			15.2				Reav (1986)
Latifoliadas	Edad	Arb/ha	I (%)	S (%)	PD (%)	P (mm)	Referencia
<i>Quercus mongolica</i>	8-20		16.2			773	Kim y Woo (1988)
<i>Populus alba</i>	35		41			453	Gonzales de Tanago (1988)

Latifoliadas	Edad	Arb/ha	I (%)	S (%)	PD (%)	P (mm)	Referencia
<i>Populus tremuloides</i>			7 15.7 10.3				Gonzales de Tanago (1988)
<i>Acacia farnesiana</i>			27.2	0.6	72.2	230	Navar y Bryan (1990)
<i>Diospyrus texana</i>			27.2	5.6	67.2		Navar y Bryan (1990)
<i>Betula sp.</i>			14.7				Reav (1986)
<i>Fraxinus sp.</i>			13.9				Reav (1986)
<i>Carpinus Orientalis</i>			13.6				Reav (1986)
<i>Robinia pseudoacacia</i>			6.5				Reav (1986)
<i>Ailantus glandulosa</i>			3.4				Reav (1986)
<i>Fraxinus ornus</i>			2.6				Reav (1986)
Bosque tropical	25		18.3	1.12	80.65		Cicco et al., (1988)
			21.8	0.64	77.56		
	Maduro			9	52		
	Joven			4	68		
Bosque amazónico			5	8	87		Jordan y Heveldop (1984)
			19.8				Franken et al. (1987)
Bosque amazónico			22	0.3	77.7		Franken et al. (1987)
			25				Leopold et al. (1987)

I= Intercepción; S= Esgurrimiento fustal; PD= Precipitación directa; P= Precipitación

2.6. Evapotranspiración

La evaporación es un término combinado que comprende los tres procesos básicos mediante de los cuales el agua es perdida desde el bosque a la atmósfera: (1) evaporación del agua directamente desde el piso del bosque, del suelo y de la superficie del agua, (2) Evaporación del agua que es interceptada por el dosel del bosque y (3) transpiración de los vegetales. Todos estos procesos involucran vaporización del agua, para lo cual se requiere de gran cantidad de

energía solar. La evapotranspiración representa una pérdida de agua que podría en otro caso estar disponible para el flujo de cauce (Wenger, 1984).

2.7. Transpiración

La eliminación de agua desde los vegetales en forma de vapor se conoce con el nombre de transpiración. Los órganos transpiratorios por excelencia son las hojas. Las pérdidas de agua se producen principalmente a través de los estomas que representan aproximadamente el 90% de la transpiración total, la restante se produce por vía cuticular (Devlin, 1970).

Los mecanismos de absorción de agua y el grado de flujo que tiene desde el suelo a la planta están controlados, primeramente, por el agua evaporada en las hojas (o sea, a lo largo de un gradiente generado por la presión de vapor). Por efecto de la transpiración el agua se mueve desde el suelo a la epidermis y la corteza de las raíces y los espacios libres, al xilema de las raíces, xilema del tallo, a las venas y mesófilos de las hojas y espacio libre, a través de los estomas, y hacia la atmósfera, a lo largo de los gradientes decrecientes del potencial de agua (Spurr y Barnes, 1990).

De acuerdo a Calder (1986), las pérdidas por transpiración en los eucaliptos, así como para la mayoría de los tipos vegetales, dependen principalmente de:

1. Demanda climática. La cual está referida a la radiación predominante, déficit hídrico atmosférico, temperatura y velocidad del viento.

2. Mecanismo de respuesta fisiológica los cuales controlan la apertura estomática en respuesta a las condiciones ambientales tanto presentes como pasadas. De importancia especial son aquellos mecanismos que cierran los estomas en respuesta a un aumento en las tensiones hídricas del suelo y a un aumento en las deficiencias hídricas atmosférica. Estos mecanismos actúan en una gran cantidad de especies de plantas y árboles, tanto a escalas de hojas como de árboles y bosque.
3. Estructura de copas, especialmente el Índice de Area Foliar (I.A.F.).
4. Disponibilidad de agua en el suelo para las raíces.

Según Florence (1986), el uso del agua por parte de las especies arbóreas está influido por factores atmosféricos, factores edáficos y factores fisiológicos y morfológicos.

2.7.1 Atmosféricos. La tasa de transpiración depende del poder evaporativo del aire, el cual está determinado por su temperatura, el viento, el déficit de saturación, la cantidad de luz, lo cual controla parcialmente la apertura de los estomas y la disponibilidad de humedad en los tejidos de la hoja que a su vez dependen de la disponibilidad de humedad en el suelo (Lull, 1964).

La temperatura del aire y la luz es controlada por la radiación solar, lo que explicaría las diferencias entre la transpiración diurna y nocturna en la mayoría de las plantas, ya que en el período de más alta temperatura y luminosidad la tensión por transpiración es mayor. La luz y la temperatura alcanzan su mayor intensidad durante el mediodía o temprano en la tarde. La luz aumenta la

transpiración más que la evaporación mientras que el viento incrementa más la evaporación (Lull, 1964).

Diversos autores señala que a mayor radiación solar mayor es la intensidad de transpiración (e.g. Lull 1964; Devlin 1970; Wenger 1984 y López Cadena de Llanos 1990). Según López y Blanco (1978), citados por Huber et al. (1986), esto se debería a que la absorción de energía por las hojas hace que su temperatura aumente y con ello la energía cinética de las moléculas del agua aumente, pudiendo éstas escapar más rápidamente de las hojas. Además la radiación solar también influye en la apertura estomática. A través de los estomas se produce la difusión del vapor de agua hacia la atmósfera exterior, siempre que la planta posea suficiente agua disponible (Aslyng 1974, citado por Huber et al. 1986).

Al interactuar la humedad relativa del aire con la temperatura, esta última se relaciona directamente con la presión de vapor. Si la temperatura del aire es alta la humedad relativa es baja, lo que produce una mayor gradiente de humedad entre la atmósfera interna de la cavidad estomática y la temperatura exterior, esto traerá por consiguiente una mayor transpiración; a medida que la humedad relativa disminuye la intensidad transpiratoria aumenta. Si la humedad relativa aumenta la intensidad transpiratoria disminuye (Huber et al. 1983).

Huber et al. (1986), en un estudio realizado en Valdivia encontraron para las especies *Gewuina avellana*, *Drimys winteri*, *Embothrium coccineum*, *Aextoxicon punctatton* y *Eucryphia cordifolia*, que los valores máximos de

transpiración ocurrían durante la época del año en la cual existían las mayores radiaciones solares, las mayores temperaturas del aire y los menores valores de humedad relativa. Durante el invierno en condiciones meteorológicas contrarias a las antes señaladas los consumos de agua fueron mínimos. Situación similar encontraron Huber et al. (1983), para *Nothofagus dombeki* y *Nothofagus obliqua* (Tabla 5).

De acuerdo a Huber et al. (1986), la intensidad transpiratoria no está regulada por una variable meteorológica en particular, sino que es la resultante de la interacción de todas ellas; además, de acuerdo a sus estudios el factor de mayor importancia es la temperatura.

TABLA 5. Valores comparativos de consumo de agua anual y estacional de algunos árboles chilenos.

Especie	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Nothofagus obliqua</i>	300.4	646.7	596	115.5
<i>Nothofagus dombeyi</i>	162.2	708.5	519	146.8
<i>Drimys winteri</i>	109	202.6	150	52.6
<i>Embothrium coccineum</i>	114	299.3	563	36.3
<i>Gevuina avellana</i>	171	651.3	544	107.3
<i>Aextoxicum punctatum</i>	193	656.9	521.7	135.2
<i>Eucryphia cordifolia</i>	297	487.7	347.3	140.4

Fuente: Huber et al. (1983) y Hubert et al. (1986)

1. Consumo de agua por metro cuadrado de superficie foliar en litros
2. Consumo anual de agua por transpiración en litros.

3. Consumo de agua en verano por transpiración en litros.
4. Consumo de agua en invierno por transpiración en litros.

Según Morton (1984), la transpiración está limitada por la apertura y cierre de estomas. Estos no solo responden al estrés interno causado por las limitantes en el abastecimiento de agua desde el suelo sino que también a factores del medio externo tales como la radiación solar, la temperatura, el déficit de presión de vapor y la concentración de dióxido de carbono.

2.7.1. Fisiológicos y morfológicos. La capacidad de transpiración de los árboles puede ser estimada por la siguiente relación.

$$T = V_e \times q_c$$

$$\text{Donde } q_c = (q_s (I.A.F. \times 2))$$

Esto muestra que los principales factores que afectan la transpiración son: el I.A.F. (Índice de área foliar), la conductancia estomatal (q_s) y la diferencia de presión de vapor entre la hoja y la atmósfera (V_e) (Florence, 1986). Dolman et al. (1988), Iacobelli y McCaughey (1993), indican que la conductividad estomatal es dependiente en gran parte de la interacción de la radiación solar, del déficit de presión de vapor, de la temperatura y de la humedad del suelo, aunque también de otros factores tales como la estación del año, la edad de la hoja, el estado de desarrollo de la planta y la exposición y posición dentro del dosel.

Según varios autores (e.g. Singh y Szeics 1982; Ginter-Whitehouse et al. 1983, y Iacobelli y McCaughey 1993), indican que las variaciones estacionales en la conductividad estomatal también pueden ser atribuidas entre otros factores a cambios en el área foliar, a la dinámica de las raíces y el efecto de la edad de las hojas.

Los cambios diarios en conductancia estomatal se relacionan, principalmente, a cambios en la radiación solar, al déficit de presión de vapor es bajo puede resultar alta conductividad estomatal coincide con una disminución en la radiación solar, aunque, cuando el déficit de presión de vapor es bajo puede resultar alta conductividad estomatal desde niveles bajos de radiación solar; además, también pueden existir variaciones por la posición de las hojas en el plano vertical del dosel (Iacobelli y McCaughey, 1993).

Estudios fisiológicos que comparan las tasas de transpiración y la conductividad, ambas con déficit de presión de vapor en el nivel de la hoja, demuestran que éstas presentan diferencias significativas entre especies de árboles. Por ejemplo, las especies deciduas tienden a tener mayores tasas de transpiración y conductividad que las especies de coníferas (Hinckley et al. 1978 citados por Gholz et al. 1990). Sin embargo, cuando la comparación fue realizada a nivel del dosel de copas del bosque, se observaron diferencias pequeñas en la estimación de la tasa de evapotranspiración entre especies y regiones (Tablas 6). De especial interés es observar que el máximo registro fue alcanzado por la especie *Pinus radiata* D. Don.

TABLA 6 Tasa típicas de transpiración para diversos bosques templados

Especies	Transpiración (mm/hr)	
	Valor promedio	Valor máximo
Coníferas		
<i>Pinus sylvestris</i>	0.20	0.48
	0.20	0.50
	0.40	0.57
	0.15	0.25
<i>Pinus radiata</i>	0.30	0.50
	0.40	0.80
<i>Picea sitchensis</i>	0.30	0.52
	0.20	0.50
<i>Picea abies</i>	0.30	0.52
	0.30	0.54
	0.3	0.54
<i>Abies balsamea</i>	0.4	0.75
Latifoliadas		
<i>Betula verrucosa</i>	0.45	0.60
<i>populus tremula</i>		
<i>Quercus robur</i>	0.3	0.60
<i>Acer platanoides</i>	0.35	0.60
<i>Tilia cordata</i>	0.3	0.60

Fuente: McCaughton y Jarvis (1983), Citados por Gholz et al. (1990).

Aparte del control estomatal, la tasa de transpiración de un árbol "aislado" depende de su área foliar y la forma en que el follaje está distribuido, de la intercepción de energía radiante y de las variaciones de viento en el campo. Por lo tanto, la información del área foliar de los árboles es esencial para calcular las tasa de transpiración (Landsberg y McMurtui, 1984).

La transpiración aumenta cuando área de la superficie total de las hojas del árbol, por unidad de área del terreno (índice de área foliar, IAF), alcanza un nivel máximo en el cual gran cantidad de la radiación es absorbida. Un aumento del IAF, sobre este nivel máximo tiene un efecto mínimo sobre el uso del agua. Conviene destacar que el "área foliar efectiva" (área foliar que realmente absorbe radiación) es menor que el área foliar total, debido al ángulo de la hojas y la forma del dosel (Florence, 1986).

De acuerdo a Leuning et al. (1991), la transpiración anual no es afectada por el IAF, cuando en el suelo la capacidad de almacenaje de humedad es pequeña y que solo difieren las tasa de agotamiento. La vegetación con alto IAF y/o no sensibles al déficit de presión de vapor (DPV), tiene un periodo más largo e intenso de estrés hídrico que la vegetación con bajo IAF y/o fuerte sensibilidad a (DPV). Sin embargo, la transpiración anual es dependiente del IAF, cuando la vegetación tiene acceso a aguas subterráneas.

De acuerdo a Huber et al. (1986), las diferencias de consumos anuales de aguas entre especies del bosque siempre verde Valdiviano, con iguales condiciones ambientales, se deben al grosor de la hoja (a menor grosor de la hoja mayor consumo de agua) y principalmente al número de poros estomáticos por milímetro cuadrado de superficie de hoja (a mayor número de poros mayor consumo de agua).

La cantidad de agua que puede ser removida desde el suelo por los árboles depende del volumen de suelo utilizado por las raíces, de la intensidad en que dicho volumen es utilizado (dado por la longitud o área superficial de la

raíz por unidad de volumen), de la capacidad de posesión del agua del suelo y de las características hidráulicas (Landsberg y McMurtrie, 1984).

Dentro del sistema radicular las raíces las raíces finas tienen gran importancia, puesto que contribuyen considerablemente al área efectiva superficial de las raíces (Landsberg y McMurtrie, 1984). En el caso *Eucalyptus regnans*, Aston (1975), señala que las raíces finas se presentan a través de todo el perfil pero que se concentran en los primeros 60 cm de profundidad y, en promedio el sistema radicular no supera 1,7 m, previa subdivisión en raíces de menor diámetro, observándose diferencias notables producto de la exposición o de la disponibilidad de agua.

Keyer y Grier (1981), no establecieron diferencias significativas entre las masas de raíces gruesas y finas para *Pseudotsuga menziesii* establecidos en sitios de alta y baja productividad, pero indican que la tasa de cambio de las raíces finas en el sitio de baja productividad fue dos y media veces más que la del sitio de alta productividad.

Según McDonald et al. (1986), citados por Sands y Mulligan (1990), la tasa de crecimiento de las raíces de *Betula pendula* disminuye más lentamente que el resto del árbol cuando está sujeta a un crecimiento en la disponibilidad de nutrientes. En los suelos deficientes en nutrimento las raíces serán menos eficientes en la toma de agua debido a la reducción de la conductividad hidráulica. De este modo la fertilización puede causar una mejora directa de la relación agua-árbol por el incremento de la conductividad hidráulica.

Normalmente la densidad de raíces es mayor cerca de la superficie del suelo y disminuye exponencialmente con la profundidad. Esto se debe a que cerca de la superficie del suelo los nutrimentos, la consistencia del suelo, la aireación y la temperatura son más favorables. La configuración de las raíces se modifica por cambios en el ambiente del suelo, especialmente la distribución de agua y nutrientes. Como un ejemplo de esto la densidad de las raíces de *Pinus radiata* en cinco tipos de suelos, fue altamente correlacionada con la cantidad de materia orgánica del suelo (Sands y Mulligan, 1990).

Las raíces de los árboles se pueden extender en profundidad sólo si hay agua para soportar este crecimiento. Los árboles que se desarrollan en suelos donde existe un pleno abastecimiento de agua de la superficie no pueden desarrollar raíces profundas y, por lo tanto son vulnerables en tiempo de sequía. Aston (1975), indica que las raíces de *Eucalyptus regnans* maduros presentes e riberas de río no superaban los 30-45 cm de profundidad. De este modo de acuerdo a Sands y Mulligan (1990), para un nivel dado de asimilación, las raíces pueden alterar su configuración para tomar ventaja de la distribución de partículas de agua y nutrimento. La configuración apropiada será un balance entre estrategias o intensivas, este balance puede cambiar en espacio y tiempo. El enraizamiento "extensivo" se produce cuando una longitud dada de raíces con una baja densidad utiliza un gran volumen de suelo. Un ejemplo de este tipo es el enraizamiento profundo de los árboles para extraer agua de las profundidades. El enraizamiento "intensivo", se da cuando una longitud de

alta densidad utiliza una pequeña cantidad de volumen de suelo.

En un suelo profundo con tres perfiles definidos, desde arenoso, limo arenoso a arcilloso, Carbón et al. (1980), encontraron para *Eucalyptus marginata* desarrollos radiculares de hasta 19 m, aproximadamente, en donde no hubo presencia de nivel freático, y de hasta 15 m en donde si la hubo.

Samraj et al. (1988), indican que *Eucalyptus globulus* alcanzaron en Osamund Nilgiris, una profundidad de raíces de 2,8 m en la primera rotación de 10 años, sobre suelos limo arenosos a limo arcillosos.

En un bosque de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* de 10 años desarrollado cerca de Roma, Ghosh et al. (1978), citado por Rosales (1993), midieron profundidades de raíces de 4,2 m para *Eucalyptus globulus* y de 2,2 m para *Pinus radiata*

Para *Eucalyptus wandoo* cuando el nivel freático se encontraba a 9 m Greenwood et al. (1982), encontraron una profundidad radicular de 1,2 m. En tanto Greenwood et al. (1985), registraron para las especies *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus cladocalyx*, *Eucalyptus wandoo* y *Eucalyptus leucoxilas* profundidades radiculares de hasta 6 m en un sitio con nivel freático localizado a 5 m es decir más que el nivel freático.

La profundidad y extensión del sistema radicular son factores que determinan el consumo de agua de las plantas.

La sustitución de especies de sistema radicular profundo por otras, de raíces más superficiales pueden favorecer el balance hídrico en los sistemas semiáridos (López Cadenas de Llano, 1990).

La densidad del sistema radicular en los árboles es menor que el de los cultivos anuales. Los cultivos anuales tienen sólo una estación para utilizar la disponibilidad del volumen de suelo, en cambio los árboles pueden extenderse por muchos años. Continuamente las raíces de los árboles se renuevan y ocupan nuevas posiciones en el suelo. De este modo, los árboles pueden utilizar más efectivamente el suelo con sistemas radiculares menos densos que los cultivos anuales (Sands y Mulligan, 1990).

Huber et al. (1985), encontraron en tres rodales de *Pinus radiata* que durante el verano las reservas de agua del suelo se agotaron considerablemente hasta los 2 m de profundidad, mientras que en una pradera esta situación sólo se registraba en el primer metro de suelo.

2.7.3 Disponibilidad de agua en el suelo. Según Spurr y Barnes (1980), cuando los árboles tienen libre acceso a cantidades ilimitadas de agua pueden transpirar inmensas cantidades de este elemento. Los *Populus sp.* y otras especies que crecen en las cercanías de cursos y reservas de agua permanentes, pueden transpirar hasta 1000 mm de agua en el transcurso de una estación de crecimiento. Sin embargo, cuando los árboles no tienen acceso a los niveles freáticos, pueden mantener tasas máximas de transpiración sólo si la recarga de humedad al suelo es adecuada. Además, el agua disponible es extraída primeramente desde la zona

de alta concentración de raíces en la capa superior del suelo, luego en la estación de crecimiento la extracción continúa hacia abajo.

La disponibilidad de un nivel freático para las raíces de los árboles tiene aspectos beneficiosos y negativos. El lado positivo es que proporciona agua adicional para la transpiración; aunque el consumo sea excesivo, el árbol absorbe toda la humedad necesaria para transportar la cantidad óptima de nutrientes al follaje. El lado negativo, es que un nivel freático permanente, normalmente, impide el desarrollo de las raíces hacia abajo, debido a la cantidad insuficiente de oxígeno. Por otro lado, cuando el agua subterránea está al alcance de las raíces del bosque el nivel freático varía a través de la estación y logra su mayor nivel justo antes del inicio de la estación de crecimiento, comenzando a disminuir cuando el bosque empieza a agotar el suplemento de agua (Spurr y Barnes, 1980).

Sands y Mulligan (1990), indican que cuando los suelos presentan escasez de agua los árboles logran adaptarse a tales condiciones. Estos autores señalan que algunas de estas adaptaciones al déficit de agua son:

Incremento de la cantidad absorbida. Un incremento extensivo e intensivo en la longitud de la raíz podría incrementar la absorción hídrica. De acuerdo a Talsma y Gardner (1986), citados por Sands y Mulligan (1990), el hábito de enraizamiento profundo puede aumentar el almacenaje efectivo del agua disponible en el suelo y,

además, ser importante para la supervivencia de la planta durante la sequía.

Reducción de la cantidad de pérdidas. Las plantas pueden reducir las pérdidas de agua disminuyendo el área de la superficie evaporante de las hojas. Estas hojas se pueden cambiar prematuramente en respuesta a un déficit de agua. Por ejemplo, algunas especies de eucaliptos dejan caer ramas para alcanzar el mismo efecto. Esta reducción en el número de hojas conservará el agua del suelo a expensas del crecimiento. Las pérdidas también pueden ser reducidas por adaptaciones de las hojas pequeñas (e.g. hojas velludas, hojas azules, hojas con menor área superficial por unidad de masa, hojas pardas y hojas que se inclinan para minimizar la radiación incidente) adaptaciones que son irreversibles. En cambio una adaptación reversible es la que presentan muchas hojas de eucaliptos, las cuales cuelgan verticalmente y se pueden volver de canto al sol en condiciones de déficit de agua, recuperando su posición original cuando las condiciones de agua y temperatura son favorables. Sin embargo, el mecanismo más importante es la regulación estomática, la cuál también es reversible. Los árboles que crecen en ambientes secos presentan regulaciones estomáticas bien desarrolladas.

Reducción de los requerimientos absolutos. Las adaptaciones de esta categoría son aquellas que habilitan al árbol a funcionar con menores niveles de agua y de nutrientes que los normales (Sands y Mulligan, 1990).

Existen evidencias que las etapas de crecimiento influyen en el uso del agua. Black (1967), citado por Anderson

(1976), encontró que algunos rodales de *Sequoia sempervirens* de segundo crecimiento, consumían la humedad del suelo más rápidamente que los rodales maduros.

Al comparar los niveles de transpiración anual de diferentes bosques europeos, Roberts (1983), encontró que existen pequeñas diferencias en sus registros y presentan niveles más bien bajos (333 mm/año). Algunos factores que influyen en esta situación son: presencia de sotobosque, que actúa como amortiguador efectivo para nivelar algunas diferencias en las tasas de transpiración de los árboles; las variaciones en el contenido de agua en el suelo, que tienen, en muchas circunstancias, un efecto insignificante en las tasas de transpiración; tipo de establecimiento, los bosques establecidos naturalmente o artificialmente tienen requerimientos de agua que no exceden la disponibilidad del sitio en los años secos y resistencia de superficie de hojas, una respuesta retroactiva, marcadamente negativa a la resistencia de superficie a las condiciones del clima restringe el rango de pérdidas por transpiración.

La importancia del sotobosque fue ilustrada por Roberts et al. (1980), citados por Roberts (1983), quienes mostraron que el sotobosque conformado por *Pteridium aquilium* presente bajo *Pinus sylvestris* podría ser responsable del 60% de la transpiración del bosque en condiciones secas, en tanto que bajo condiciones normales la transpiración de *Pteridium aquilium* puede alcanzar un 25% del total.

2.7.4 Efecto de la densidad en la transpiración de los rodales. El consumo de agua por transpiración y evaporación total de los árboles está íntimamente relacionado con el

volumen del follaje. Esto permite en cierta medida, regular el régimen de humedad del suelo mediante la selección de especies y tratamientos silvícolas.

De acuerdo a Greg et al. (1990), diversos estudios comparativos han demostrado que la disponibilidad de humedad del suelo en la estación de crecimiento es mayor en rodales con área basal baja que en rodales de área basal alta. Del mismo modo, Black et al. (1980), indican que en un rodal raleado de Pino oregon, con un sotobosque denso sobre un rango amplio de valores de agua extraída en la zona de raíces, la tasa de transpiración de los árboles individuales fue muy similar a la de un rodal cercano no raleado y con escaso sotobosque. Esto ocurrió a pesar que la densidad del rodal fue reducida a menos de la mitad que la del rodal no raleado; el sotobosque consumió la mitad del agua que se extrajo del suelo. Además, en áreas con pocas lluvias durante la estación de crecimiento donde los suelos tienen una baja capacidad de almacenaje de agua, el raleo con reducción o eliminación del sotobosque podría resultar en un uso más eficiente del agua por los árboles. Resultado similar encontró Black (1979).

Eastman y Rose (1988), citados por Rosales (1993), después de estudiar el efecto del espaciamiento sobre la evaporación en *Eucalyptus grandis*, señalan que al comparar el agotamiento del suelo en profundidad con respecto al espaciamiento, los eucaliptos plantados a mayor espaciamiento absorben agua, en un radio mayor a 1,2 m del árbol, en vez de a grandes profundidades, mientras que a menos espaciamiento los árboles son forzados a absorber agua a mayores profundidades debido a la competencia de los

árboles adyacentes expresado en agotamiento del agua del suelo en las capas superiores.

Algunos estudios de raleo (e.g. Zahner y Whitmore, 1960), indican que si la densidad del rodal es disminuida, el área foliar del rodal disminuye y el agua en el suelo aumenta, lo que provoca que la tasa de crecimiento de los árboles remanentes aumente. No obstante, en general, los potenciales hídricos en las hojas de los árboles remanentes son iguales o aún menores que los de un rodal adyacente no raleado debido a la alta carga de calor y otros cambios en el microclima (Succoff y Hong 1974; Gregg 1986, citados por Gholz et al. 1990).

2.8. Evaporación.

Esta representa el paso del agua, en forma de vapor, desde el suelo y superficies vegetales a la atmósfera. La evaporación a partir del suelo está condicionada a los factores meteorológicos, pero también a las propiedades del suelo y en particular a su contenido de humedad (Daniel et al. 1989).

Según diversos autores (e.g. Custodio y Llama 1976; Daniel et al. 1982; Donoso 1990 y López Cadenas de Llano 1990), algunos de los factores que influyen en la evaporación son:

- 1.- La temperatura del aire que determina la capacidad de la atmósfera para retener la humedad.
- 2.- La humedad atmosférica, que determina el déficit de saturación. A mayor déficit mayor capacidad del aire para retener humedad.

- 3.- El movimiento del aire. A mayor velocidad del aire mayor tensión evaporativa, en consecuencia mayor evaporación.
- 4.- El patrón de lluvias determina en gran parte la capacidad de humedad disponible en la superficie del suelo.
- 5.- La cantidad de agua presente en la capa superficial del suelo.
- 6.- La temperatura en la superficie del suelo.
- 7.- La tasa de movimiento del agua o del vapor de agua entre los niveles inferiores del perfil y la superficie del suelo, que depende de la textura, de la compactación y de los movimientos capilares asociados.

De acuerdo a López Cadenas de Llano (1990), las experiencias realizadas han puesto de manifiesto que:

- La evaporación es diferente, según la composición de la cubierta.
- Al aumentar la edad y disminuir la espesura de la masa forestal, la evaporación tiende a aumentar.
- En suelos cubiertos con hojarasca sin descomponer la evaporación es inferior a la producida en un suelo arenoso desnudo.

Debido al efecto de la vegetación, la capacidad evaporativa del aire incrementa al aumentar la altura sobre el suelo. Mientras más densa y más alta sea la cubierta vegetal, más se detiene la radiación solar y el viento y, más se retiene la humedad bajo ella, o sea, hay menor evaporación. Además, la evaporación cambia durante el día según las variantes que se produzcan en los factores que la determinan. En campo abierto, en la mañana, la evaporación casi no existe,

debido a la baja temperatura, a una humedad relativa cercana al 100% y a la existencia de rocío. En el bosque la evaporación continúa en la mañana, porque no se produce rocío en su interior y la temperatura es más alta (Daniel et al. 1982; Donoso 1990).

2.9. Almacenamiento Superficial.

Este término está referido al almacenaje que ocurre en la superficie del suelo, ya sea como agua en el piso del bosque o litera, como agua detenida en las depresiones del suelo o como agua mantenida en la forma de nieve. Las nieves almacenadas pueden contribuir al almacenaje de superficie, ya sea en estado sólido o líquido. La duración y volumen de la detención dependerá de la producción de la nieve, de la temperatura del aire, de la porosidad y del contenido inicial de agua del suelo. El agua almacenada en la superficie del suelo eventualmente abandona la superficie como flujo superficial, como evaporación a la atmósfera, o como infiltración en el suelo (Anderson et al. 1976)

2.10. Infiltración.

Esta es el paso del agua de la superficie del suelo al interior de éste. De este modo, se distingue de la percolación o filtración, fenómeno en estrecha correlación con la infiltración, pero cuya función es la circulación del agua en el interior del terreno (Salgado, 1989). Algunos de los factores que pueden influir en la infiltración son:

2.10.1 Textura y estructura del suelo. En los suelos de textura gruesa, arenosos con gravas y piedras, el agua

infiltra rápidamente y no tiene oportunidad de escurrir, aún en fuertes pendientes y con lluvias intensas. En forma contraria, los suelos muy arcillosos tienden a hincharse con los primeros milímetros de agua caída, los que taponan los microporos provocando que el agua sólo pueda escurrir por la superficie. En esta situación el efecto de la textura está fuertemente correlacionado con el contenido de humedad del suelo (Lull 1964; Donoso 1990).

La agregación de suelos de textura fina puede causar que las partículas pequeñas actúen como partículas grandes, incrementando el espacio entre los poros además de la infiltración (Wenger, 1984). La Tabla 7 muestra que la permeabilidad de los suelos se ve favorecida por la presencia de bosques.

TABLA 7. Relación de la infiltración con la edad y permeabilidad en dos bosques distintos.

Tipo de Bosque	Edad	Porosidad Horizonte A	Porosidad Horizonte B	Porosidad Horizonte C
Robles	26	55.2	58.2	11.2
	60	58.2	58.7	12.54
	130	54.4	48	7.01
Fresnos	18	56	49.8	20.74
	36	58.6	56.7	22.91
	65	58.4	48.9	16.79
Borde del bosque				6
Pastos cortados a 1 km del bosque				0.3
Zonas cortadas del bosque				7.63

Fuente: López Cadenas de Llano (1990)

De acuerdo a López Cadenas de Llano (1990), las razones que favorecen esta manifiesta permeabilidad de los suelos que soportan bosques son, por una parte, la continua incorporación de materia orgánica al suelo forestal, como consecuencia de la caída de las hojas y ramillas, lo que contribuye a que su estructura sea más granular; esta incorporación varía con el tipo de bosque y a lo largo de las estaciones del año. Por otra parte, la congelación, que cuando se produce en los suelos con abundante materia orgánica casi no afecta la penetración del agua. Con relación al sistema radical, especialmente si se trata de vegetación arbórea, al descomponerse las raíces crean innumerables canalillos, más o menos vacíos o rellenos de materia sumamente permeable, por donde circulan las aguas con relativa facilidad.

De acuerdo a las condiciones anteriormente descritas López Cadenas de Llano (1990), indica que podrían establecerse las conclusiones siguientes: una cubierta arbórea con tapiz natural no perturbado mantiene la máxima infiltración en una situación dada. La infiltración es mayor en masas arbóreas adultas que en las jóvenes; en el bosque sin pastoreo que en los de pasto; en los montes claros que en los rasos. La diferencia entre suelos forestales y agrícolas puede llegar a una relación de 100 a 2, por unidad de superficie. Según Lull (1964), una litera de aproximadamente 12 mm es la mínima profundidad para proporcionar una adecuada protección.

Si se tala un bosque y el suelo queda desnudo debido a las operaciones de maderero o al fuego o simplemente debido a las condiciones naturales del tipo vegetacional, las

lluvias arrastran fácilmente el mantillo y materia orgánica superficiales y el escurrimiento aumenta considerablemente (Donoso, 1990). Cuando el piso del bosque es removido la tasa de infiltración se reduce. Por ejemplo Arand (1960), citado por Lull (1964), en un estudio realizado en Minnesota registró diferentes tasas de infiltración de acuerdo al tipo de alteración efectuada en el bosque (Tabla 8).

TABLA 8. Tasas de infiltración para diferentes alteraciones de un suelo forestal.

Alteraciones del suelo forestal	Infiltración mm/hr
Piso del bosque inalterado	60
Capas L y F removidas mecánicamente	49
Piso del bosque quemado anualmente	40
Pastizal desmejorado	24

Fuente: Lull (1964)

2.10.2 Compactación del suelo. La compactación reduce la porosidad y la tasa de infiltración del agua en el suelo. La alteración del suelo y la compactación durante las actividades de cosecha de madera varían dependiendo del tipo de suelo y del método de cosecha. En general, el tractor de madereo altera y compacta grandes áreas del sitio, casi 30-60% del área es alterada y 20-30% es compactada (Pritchett y Fisher, 1987).

2.10.3 Contenido de humedad del suelo. La capacidad de infiltración disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo, debido a que los poros se llenan de agua

y los materiales coloidales (arcillas y materia orgánica) se hinchan, de tal modo que disminuye la cantidad de agua que puede penetrar el suelo (Donoso, 1990).

Spurr y Barnes (1990), señalan que cuando el agua infiltra en el suelo y este se satura, el agua contenida se puede definir en tres categorías muy específicas. La primera es el **agua libre** que llena los poros grandes (mayores de 0.005 mm de diámetro) y se drena rápidamente bajo la influencia de la gravedad. Este tipo de agua se encuentra disponible, pero brevemente para las raíces, y su efecto directo sobre el crecimiento de las plantas es transitorio. Sin embargo, en gran medida es responsable de la lixiviación del suelo. El segundo tipo es el **agua capilar**, que es agua remanente cuando se alcanza la capacidad de campo en el suelo y es mantenida en gran parte, como delgadas películas de humedad alrededor de las partículas individuales y agregados del suelo. El agua capilar será transportada gradualmente de las porciones más húmedas a las más secas del suelo. Finalmente, las partículas del suelo mantienen fuertemente otra cantidad del agua adicional que solo puede ser removida por efecto del calor prolongado que la lleva encima del punto de ebullición. Este tipo denominado, **agua higroscópica**, no se encuentra disponible para las raíces vegetales.

El límite máximo de agua de un suelo, es la **capacidad de campo**, es decir, la máxima cantidad de agua en una situación determinada contra la gravitación. La cantidad de agua disponible para las plantas, se define como aquella que retiene el suelo entre la capacidad de campo y el punto

de marchitez permanente (0,3 y 15 atmósferas aproximadamente) (Donoso, 1990).

2.11 Percolación

Es aquella parte del agua que infiltra y que no es utilizada por las plantas moviéndose libremente hasta alcanzar las napas freáticas o agua subterránea. Esta agua de percolación generalmente arrastra algunas sales solubles, fenómeno conocido como lixiviación o lavado de suelo. Las pérdidas de agua por percolación dependen de la cantidad de agua caída y de la duración de la lluvia (Salgado, 1989).

2.12 Escorrentía.

La precipitación que cae en una cuenca hidrográfica puede abandonarla de dos maneras, ya sea en forma de vapor o líquida. A la parte de la precipitación que se manifiesta como corriente superficial en un río se le denomina escorrentía. (Linsley et al. 1988; Salgado 1989).

La escorrentía total que se produzca en una cuenca hidrográfica provendrá de las siguientes fuentes:

La escorrentía superficial. Se refiere al movimiento de agua sobre la superficie del suelo, agua que no penetra a este, sino que se desplaza hasta llegar al cauce que sirve de drenaje al área (Donoso, 1990).

De acuerdo a Jung (1989), la teoría clásica de producción de escorrentía se debe a Horton y se conoce como teoría de la infiltración y, el escurrimiento se denomina escurrimiento superficial de Horton, u hortoniano. En su

forma más simple, la teoría de la infiltración indica que una lluvia prolongada, cayendo sobre una cuenca que tiene una capacidad de infiltración inicial uniforme y, si su intensidad es mayor que la menor capacidad límite de infiltración, producirá escorrentía o flujo superficial (hortoniano) en forma más o menos simultánea sobre toda la cuenca; esto luego de una sustracción inicial debido al almacenamiento por intercepción, en depresiones y superficial.

La escorrentía sub-superficial. Es aquella escorrentía que está formada por el agua que se infiltra y se acumula transitoriamente en el suelo, en partes poco profundas (por lo general a menos de 60 cm) encima de la napa freática y sobre una capa más o menos permeable del suelo. Como el agua se acumula sobre esta capa, bajará hacia el cauce de la corriente de agua por el talud a través de los poros del suelo. La magnitud y distribución en el tiempo de este componente depende en último término de la estructura geológica de la cuenca (Lassen 1964; Jung 1989; Salgado 1989).

Según Jung (1989), a raíz de las observaciones de aumentos de caudales sin que se observase flujo superficial importante, se llegó a la conclusión que, al menos en ciertas circunstancias, los puntos altos o picos de los hidrógramas se deben a flujo subsuperficial. Por otra parte, habitualmente se asociaban los caudales de estiaje con aportes de la napa freática; sin embargo se observa en ciertos casos caudales en estos períodos sin que exista una napa, por lo cual se concluye que el escurrimiento

subsuperficial puede ser suficiente para alimentar los cauces en estos períodos.

La escorrentía subterránea. Es aquella parte de la escorrentía total debida a la percolación profunda del agua proveniente de la lluvia o del derretimiento de la nieve, la que se incorpora al agua subterránea. El aporte de la escorrentía subterránea a la escorrentía total en el río se manifiesta con mucho mayor lentitud que los otros componentes, y además su efecto es más prolongado debido a la lentitud de los escurrimientos subterráneos (Linsley et al. 1988).

De acuerdo a Wenger (1984), la profundidad de las zonas de aguas subterráneas puede presentar rangos desde cero metros en pantanos y ciénagas a cientos de metros (100-200 m) en las zonas áridas. Además, indica que los suelos de los bosques son una fuente extensiva para la recarga del agua subterránea y el uso del bosque puede afectar la cantidad y calidad de esta agua. Esta agua es almacenada en formaciones subterráneas llamadas acuífero. El límite entre el acuífero y las zonas insaturadas del suelo se denomina nivel freático. Este nivel freático cuando intercepta con la superficie del suelo produce una vertiente o manantial.

Precipitación directa sobre los cauces y sus afluentes. Es aquella parte de la escorrentía que recibe los aportes de agua por precipitación directamente sobre los cursos de agua.

Para el análisis práctico de la escorrentía en una determinada cuenca, la escorrentía total se puede dividir

en escorrentía directa y flujo base. Se denomina escorrentía directa a aquella que se incorpora rápidamente al río poco después de la lluvia o del derretimiento de nieves. Por lo tanto, se considera que es igual a la suma de la escorrentía superficial, el flujo intermedio rápido y la precipitación sobre los cauces. En tanto que el flujo o escorrentía base queda condicionada principalmente por el aporte de agua subterránea al río y constituye por lo tanto, la escorrentía que se mantiene durante el periodo sin lluvias (Lassen 1964; Linsley et al. 1988; Salgado 1989).

La forma y el tiempo de la respuesta de la escorrentía en el cauce es muy variable dependiendo principalmente de la tormenta, del suelo y de las características fisiográficas de la cuenca. Las variables de la tormenta que afectan la respuesta en el cauce incluyen: la cantidad, la intensidad y el lapso de tiempo entre las tormentas. Las variables del suelo que afectan la respuesta del cauce incluyen: la profundidad, la textura, la permeabilidad, la infiltración, la aireación del suelo y la capacidad de almacenaje de humedad. Las características fisiográficas incluyen: la elevación, el tamaño, la orientación, la densidad y modelo del drenaje y las características del río (Wenger 1984; Salgado 1989).

De acuerdo a Wenger (1984) y Jung (1989), los hidrólogos consideran que los factores anteriormente nombrados interactúan para generar escorrentía y han desarrollado el concepto de área fuente variable. Estas áreas fuente comprenden, entre otros, suelos bajos, suelos cercanos a los cauces o a la salida de la cuenca y suelos delgados. La

extensión y ubicación de estas áreas dependen del contenido de humedad inicial del suelo, de la capacidad de almacenamiento de agua del mismo y de la intensidad de la precipitación; por ende, las áreas fuente dentro de una cuenca varían tanto su ubicación como su extensión anualmente, estacionalmente, entre lluvias y durante la tormenta. Durante una lluvia y salvo en casos de suelos extremadamente profundos y permeables, las áreas donde la saturación alcanza la superficie, se expanden y aparecen en cualquier punto en que por alguna circunstancia se ha sobrepasado la capacidad de transmitir agua subsuperficialmente. Luego, a medida que los aportes de agua a las zonas saturadas disminuyen, las áreas fuente se va contrayendo.

La vegetación juega un rol muy importante en los niveles de escorrentía. Según López Cadenas de Llano (1990), el papel fundamental que desempeña la vegetación, principalmente los bosques, sobre la escorrentía es el de modificar la forma en que estas aguas acceden a los cauces disminuyendo drásticamente las aportaciones de superficie y aumentando correlativamente las subterráneas.

De acuerdo a López Cadenas de Llano (1990), la disminución de la escorrentía superficial (Tabla 9) e incremento del flujo base por las masas forestales puede ser explicado por: la mayor capacidad de infiltración de que dotan a los suelos; la intercepción de la precipitación que disminuye la intensidad de los aguaceros y distribuye su agua a lo largo del tiempo; la mayor rugosidad de la superficie y los mayores obstáculos del contorno que producen una fuerte disminución de la velocidad de desplazamiento de las aguas

superficiales; la transpiración de las plantas que regula la dosis de humedad del suelo manteniendo una capacidad de almacenamiento disponible aún en épocas de gran humedad y, finalmente la gran capacidad de absorción de agua de las cubiertas de restos vegetales y húmicas, propias de las masas forestales, que retrasa el punto de encaramiento y por tanto, el comienzo del flujo superficial.

TABLA 9. Relación entre superficie boscosa y escorrentía.

Superficie boscosa(%)	0	10	20	30	50	60
Escorrentía superficial(%)	65-75	35-45	18-25	14-20	10-15	8

Fuente: Molchanov (1966), citado por López Cadenas de Llano (1990)

2.13 Síntesis del ciclo hidrológico.

Las principales observaciones que se desprenden del análisis del ciclo hidrológico y de las etapas que lo conforman son las siguientes:

El ciclo hidrológico. Corresponde a un modelo o idealización del movimiento, distribución y circulación del agua en la tierra.

Precipitación. Es la entrada de agua al sistema ciclo hidrológico. De acuerdo a su forma la precipitación se puede dividir en; lluvia, nieve, escarcha, granizo, rocío y neblina. Además, la lluvia según las características meteorológicas se clasifica en precipitación convectiva, frontal y orográfica.

Intercepción. Es la precipitación retenida por las cubiertas vegetales y posteriormente evaporada hacia la atmósfera. Los factores que influyen en la intercepción se pueden dividir en biológicos y físicos. El análisis de estos factores indica que:

- Las características del árbol que inciden en los montos de intercepción son la ramificación, el tipo y forma de la hoja y la edad.
- La intercepción es máxima cuando la superficie foliar presenta el máximo desarrollo.
- Generalmente los niveles de intercepción de las coníferas son mayores que los de las latifoliadas.
- El aumento de la densidad del rodal provoca un incremento en los niveles de intercepción.
- Las tormentas pequeñas pueden ser interceptadas casi en su totalidad; al aumentar la intensidad de la lluvia también aumenta la intercepción hasta alcanzar un valor máximo a partir del cual la cantidad interceptada se hace constante.
- El porcentaje de intercepción es mayor en el verano que en el invierno, debido a los menores montos de precipitación y a las mayores temperaturas del verano.
- La energía utilizada en evaporar el agua interceptada es entregada en gran escala por advección.

El escurrimiento fustal. Corresponde a parte del agua que es interceptada y alcanza el suelo escurriendo por los troncos. El escurrimiento fustal está influido por la densidad del rodal, la edad y las características del árbol especialmente el tipo de corteza.

- El escurrimiento fustal es mayor en árboles con corteza lisa y delgada.

Precipitación directa. Es la precipitación que alcanza el suelo goteando desde las hojas y ramas o pasando directamente por el dosel. Los factores que influyen en la precipitación directa incluyen la densidad del rodal, la intensidad y duración de las lluvias y la estacionalidad. El análisis de estos factores nos indica que:

- La precipitación directa disminuye con el aumento de la densidad del rodal.
- Con el aumento de la intensidad y duración de las lluvias aumenta la precipitación directa.
- La precipitación directa es mayor en el invierno en comparación con el verano.

Evapotranspiración. Es un termino combinado que comprende a la evaporación del agua interceptada, la transpiración y la evaporación

Transpiración. Corresponde a la eliminación de agua desde los vegetales. Las pérdidas de agua se producen principalmente a través de los estomas. Este proceso está influido por factores atmosféricos, edáficos, fisiológicos y morfológicos. El análisis de estos factores entrega lo siguiente:

- La transpiración aumenta con el incremento de la temperatura y la luminosidad.
- A medida que disminuye la humedad relativa aumenta la intensidad transpiratoria.

- Generalmente la conductividad estomatal disminuye con la disminución de la radiación solar.
- Al aumentar el área foliar la tasa de transpiración aumenta hasta un nivel máximo, después del cual un incremento del área foliar tiene un efecto mínimo en el uso del agua.
- La cantidad de agua que puede ser removida del suelo depende fuertemente de la profundidad y extensión del sistema radical de las plantas.
- Cuando los árboles tienen libre acceso a cantidades ilimitadas de agua pueden transpirar grandes volúmenes.
- Cuando existe escasez de agua los árboles logran adaptarse aumentando la cantidad absorbida, reduciendo las pérdidas o reduciendo los requerimientos absolutos.
- La presencia de sotobosque puede actuar como un amortiguador efectivo para nivelar algunas diferencias en las tasas de transpiración de los árboles.

La evaporación. Representa el paso del agua en forma de vapor desde el suelo y superficies de agua hacia la atmósfera. Esta condicionada por factores meteorológicos, de suelo y vegetacionales.

Almacenamiento superficial. Se refiere al almacenaje que ocurre en la superficie del suelo, ya sea como agua en el piso del bosque, como agua en las depresiones o como nieve.

Infiltración. Representa el paso del agua de la superficie del suelo al interior de este. La infiltración esta afectada principalmente por la textura y estructura del

suelo, por el contenido de humedad y por la compactación del suelo.

- La infiltración es mayor en los suelos de textura gruesa.
- La capacidad de infiltración disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo.
- La infiltración es mayor en los suelos forestales, en comparación a los suelos agrícolas.
- La compactación del suelo reduce la infiltración.

Percolación. Corresponde a parte del agua que infiltra y que no es usada por las plantas moviéndose hasta alcanzar las aguas subterráneas.

Escorrentía. La precipitación que cae en una cuenca hidrográfica puede abandonarla en forma de vapor o líquida. La parte líquida corresponde a la escorrentía total, la que se divide en: escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial, escorrentía subterránea y precipitación directa sobre los cauces y sus afluentes. La escorrentía total también se puede dividir en escorrentía directa y flujo base, siendo el flujo base la escorrentía subterránea.

- La presencia de bosques disminuye la escorrentía superficial y aumenta el flujo base.

III EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS DE BOSQUES EN LA PRODUCCION DE AGUA

Los tratamientos de bosques provocan una respuesta hidrológica que depende de las características de la vegetación, de la naturaleza del tratamiento y de la recuperación posterior a la alteración. Tales tratamientos pueden variar, entre otros, desde corta de árboles, construcción de caminos, reforestación, quemas, conversión de especies y otros. Se presentará en términos cualitativos y cuantitativos los efectos que dichos tratamientos tienen en la producción de agua.

3.1 Corta de árboles.

La corta de árboles incluye cosecha del total de la existencia (tala rasa), como también las cortas parciales. Además, también se debe considerar la construcción de caminos y la disposición de los desechos que son una parte integral de la cosecha de madera. La corta de los árboles afecta la cantidad del recurso de agua por su influencia en los procesos hidrológicos fundamentales.

De acuerdo a Bowes et al. (1984), la influencia de la vegetación en el aumento o disminución de la producción de agua dentro de una cuenca esta comprendida de tres procesos, los cuales son: evaporación del agua interceptada, la transpiración y la acumulación de nieve, que afecta la cantidad y época de derretimiento.

La evapotranspiración es reducida con la corta de los árboles, su reducción es en proporción al área de la cuenca que es afectada (Anderson et al. 1976; Bosch y Hewlett

1982; Evans y Patric 1983; Borg et al. 1988). Individualmente se reduce la intercepción y la transpiración (Hsia 1987), quedando más agua disponible para otros procesos hidrológicos como flujo de cauce, escorrentía superficial y recarga de acuíferos subterráneos (Borg et al. 1988; Ricker, 1989).

Según Anderson et al. (1976), la tala de árboles latifoliados deciduos no reduce de manera clara la intercepción, puesto que los desechos del madereo (troncos, ramas y hojas) y el sotobosque remanente continúan interceptando humedad, además en las latifoliadas las cortas parciales tiene efectos menores en la intercepción de nieve. Por otra parte las especies coníferas debido a sus mayores tasas de intercepción pueden reducir en mayor proporción los niveles de intercepción con la corta, incrementando sustancialmente el aporte de agua al flujo de cauce.

De acuerdo a Lassen (1964), la corta del bosque tiene un efecto sobre la corriente de agua, que dependerá principalmente, de la proporción y del número total de árboles cortados así como de la profundidad del suelo. Dependiendo de la profundidad de la raíz y como se altere y comprima la superficie del suelo producto del madereo, la producción de agua puede ser alterada por la corta comercial de árboles. La profundidad de las raíces de los árboles derribados nos indicará el efecto de la corta, es decir, mientras más superficiales sean las raíces de los árboles menor será el efecto sobre la producción de agua.

Además, la corta de árboles puede afectar la acumulación de nieve. Troendle y Meinnan (1984), citados por Troendle y King (1986), indican que en los sitios donde la precipitación es principalmente por nieve, ocurren dos procesos de cambio; el cambio de la aerodinámica de los rodales los cuales alteran los patrones depositacionales de la nieve, que son una función del tamaño de las aberturas, de la rugosidad del dosel, de la exposición al viento y, la reducción de la cobertura foliar y la superficie interceptante resultando en grandes precipitaciones directas y menores oportunidades para la intercepción.

Otra de las fases del ciclo hidrológico que puede ser afectada por la corta de los árboles es la infiltración. De acuerdo a Anderson et al. (1976), las altas tasas de infiltración, que son un rasgo característico de los bosques, permanecen después de la cosecha de árboles excepto cuando las actividades de maderero han expuesto el suelo mineral o causado la compactación del suelo. Si se considera que al realizar en forma cuidadosa la cosecha puede deteriorar a lo más el 10% del área, el flujo sobre el terreno por la disminución de la infiltración puede tener entonces consecuencias menores. En contraste, las cosechas descuidadas pueden compactar y destruir más del 40% del área, reduciendo la infiltración y generando daños debido a los aumentos en los flujos de agua sobre el terreno causados por lluvias de alta intensidad. Además, se debe considerar que la exposición de la litera del suelo al impacto de las gotas de lluvia desagrega el suelo en partículas individuales. Estas pequeñas partículas son fácilmente llevadas por la escorrentía superficial cerrando

los poros del suelo (Edwards y Larson, 1969, citados por Blackburn et al. 1986).

De acuerdo a Gayoso e Iroume (1991), mucha de la compactación del suelo por el madereo en un bosque de *Pinus radiata* D Don ocurre en las primeras pasadas del tractor, provocando después de tres pasadas un aumento considerable de la densidad del suelo. Este aumento en la densidad del suelo es importante hasta los 20 cm de profundidad lo que indica que la compactación podría afectar los primeros 40 cm del suelo, donde generalmente se ubica gran parte del sistema radicular. Además, el madereo disminuye la porosidad total del suelo reduciendo drásticamente la conductividad hidráulica lo que resulta en un incremento potencial para el escurrimiento, la erosión y la pérdida de nutrimentos que pueden afectar la productividad del sitio.

Como resultado de lo anteriormente señalado la corta de los bosques también pueden afectar las aguas subterráneas, niveles que reflejan la magnitud, la distribución y el tipo de vegetación cambiada (Ruprecht y Schofield, 1991).

Esto ha quedado de manifiesto muy claramente en Australia, con la corta del bosque natural de eucalipto (con raíces profundas) y su reemplazo por cultivos agrícolas y pastizales lo que alteró el balance de agua y la salinidad de los cauces. Debido a esto se disminuyó la evapotranspiración, aumentando la recarga del agua subterránea y elevando los niveles freáticos (Williamson et al. 1987; Peck y Williamson, 1987a).

Ruprecht y Schofield (1991a,b) registraron los niveles de agua subterránea en una cuenca experimental de Australia la que fue parcialmente deforestada (53% del área) para el desarrollo de la agricultura. El impacto en el sistema de aguas subterráneas en el área clareada fue dramático. Las tasas iniciales de recarga eran de sólo 0,11 m/año aumentando después de 10 años a 2,3 m/año de promedio. En otro estudio de los autores en una subcuenca clareada en un 60-70%, los niveles de agua subterránea se elevaron 7,8-10,2 m, en comparación con un registro de 5,8 m de elevación producido en otra subcuenca de la misma especie a la cual se le realizó una corta de 32% de los árboles.

En tanto Peck y Williamson (1987), midieron mayores recargas del suelo y mayores elevaciones del nivel de agua en un sitio con altas precipitaciones en comparación a uno de bajas precipitaciones. El nivel de agua se elevó en 2,6 m/año, por tres años consecutivos en el sitio de altas precipitaciones.

De acuerdo a Ruprecht y Schofield (1991), las respuestas del agua subterránea al corte de árboles son dominadas por el tratamiento de la vegetación en términos de su magnitud y distribución. Además, el tipo de roca-cama y la geología de la cuenca fueron identificado como factores importantes en la determinación de cuando y donde el agua subterránea puede interceptar la superficie del terreno. Agregando que el tipo de suelo no es un factor relevante en la respuesta del agua subterránea a la corta de árboles.

Las prácticas de maderero, que remueven gran cantidad de vegetación, pueden incrementar los flujos máximos en el

área clareada, especialmente donde la regeneración es lenta o cubre sólo una parte del área, o donde la contribución de la nieve derretida es sustancial. Cuando sólo una porción de la cuenca es cortada, los flujos máximos aumentan primero durante la estación de crecimiento y sus niveles son más bien bajos (Wenger, 1984).

Conjuntamente con la corta de los árboles los caminos forestales son una parte integral de los sistemas silviculturales. El establecimiento de una red de caminos en una cuenca puede afectar la hidrología de los cauces al dejar áreas sin vegetación provocando una disminución en los niveles de intercepción y transpiración.

King y Tennyson (1984), indican que la superficie de los caminos presenta una baja permeabilidad lo que conduce a la generación de flujo superficial, este se concentra en los sistemas de zanjas y alcantarillas de descarga alterando los cursos naturales del agua. De esta manera la construcción de los caminos forestales podría afectar significativamente la cantidad y el régimen del flujo de cauce, aumentando la rapidez y el tamaño de los flujos máximos durante la época de derretimiento de nieves o durante las lluvias intensas.

Harr et al. (1975), evaluaron la respuesta del flujo de tormenta a la construcción de caminos en cuatro cuencas de Oregon, Estados Unidos, las que presentan áreas con superficies desde 40 - 304 ha. Se registraron incrementos significativos en los promedios de los flujos máximos de invierno en una cuenca que presentaba el 12% de su superficie ocupada con caminos. En tanto que en las otras

tres cuencas con el 3 - 5% de sus superficies ocupadas con caminos, no se observaron incrementos significativos en los flujos máximos. En otro estudio Ziemer (1981), estableció que la presencia de caminos, que ocuparon el 5% de una cuenca de 424 ha, no alteraron los parámetros de los flujos de tormenta, incluyendo las descargas máximas.

King y Tennyson (1984), indican que no se observan incrementos en la producción de agua si menos del 8% del área de una cuenca es ocupada con caminos. Cuando el área de una cuenca es ocupada en un 12% con caminos o con una combinación de estos con sitios compactados severamente el promedio de los flujos máximos puede ser significativamente incrementado. Sin embargo, es conveniente aclarar que estas conclusiones fueron obtenidas de estudios realizados en áreas donde las precipitaciones consisten principalmente de lluvia, en cambio, en zonas donde la precipitación mayoritariamente es por nieve la magnitud y el tipo de alteración hidrológica puede ser completamente diferente.

En un estudio realizado en seis cuencas en EE.UU., cuyas áreas registraron 28,3 a 147,7 ha, donde la precipitación en un 70% es de nieve, King y Tennyson (1984), midieron el efecto de ocupar el 3,9-5,0% de la superficie de las cuencas con caminos, encontrando cambios significativos y disimiles. Por una parte registraron un 25% de aumento en el flujo excedente de una de las cuencas y por otro lado en otra se midió una disminución del 5%; en los cuatro restantes no se observaron cambios significativos. Según los autores la alta variabilidad encontrada podría ser explicada por la ubicación de los caminos en la cuenca, los

cuales desincronizaron el flujo sub-superficial a los caudales.

3.2 El fuego.

El efecto que tiene el fuego en la hidrología varía de acuerdo a la cantidad de vegetación destruida, la cual a su vez, depende de la intensidad y el tipo de incendio. Además, la profundidad del suelo, la rapidez para establecer la nueva vegetación y las características de sus raíces, determinan el periodo y la magnitud de los cambios en la producción de agua. Según Lassen (1964), un fuego intenso en un suelo poco profundo, previamente sujeto a la evaporación en toda su profundidad tendrá, comparativamente, poco efecto en la producción de agua. Aunque se destruya toda la vegetación, las diferencias se limitan a los efectos sobre el escurrimiento superficial y a la intercepción. Por otra parte, los incendios en suelos profundos ocupados por vegetación con raíces profundas, pueden afectar más la producción de agua a causa de los cambios resultantes en la oportunidad de almacenamiento de retención, así como, también, en la intercepción y en el escurrimiento superficial. De esta manera un incendio del follaje por la gran reducción de la transpiración y de la intercepción podría restringir considerablemente la extracción de la humedad del suelo. Para el caso de áreas con nevadas intensas el fuego produce un aumento considerable en el almacenamiento de nieve.

Según FAO (1978), los incendios en cuencas ubicadas en latitudes altas provocarán incrementos pequeños en la corriente de agua debido a los bajos coeficientes de evapotranspiración. Además, cuando el incendio ocurre en un

bosque maduro y el proceso regenerativo es denso y pujante no existe aumento en el caudal hídrico, ni siquiera el primer año después de la quema, pudiendo descender el caudal al incrementarse las exigencias hídricas del bosque. Como un ejemplo de lo anterior, Langford (1976), indica que en Australia el año 1939 se produjeron incendios que arrasaron grandes extensiones de bosques maduros de *Eucalyptus regnans*. El fuego mató los árboles maduros de más de 7 metros de altura y estimuló una densa regeneración de la misma especie. El caudal hídrico de las cuencas comenzó a bajar al cabo de tres a cinco años de ocurrido el incendio, tendencia que persistió por más de treinta años. La reducción del curso de agua parece haber alcanzado su máximo entre los 15 a 20 años después de ocurrido el incendio, en tanto que el promedio de reducción anual para el periodo entre los 5 a 25 años fue de 24% del caudal medio existente con anterioridad al siniestro.

De acuerdo a FAO (1978), después de un incendio en las zonas tropicales se tendrá el máximo y más persistente aumento del caudal hídrico ya que en estas zonas tropicales a un bosque maduro y bien desarrollado lo sustituyen especies de hierbas o arbustos de raíces poco profundas. El aumento podría ser de hasta 400 mm de flujo de cauce por año con una pluviosidad anual de 1500 mm.

3.3 Plantación y regeneración de los árboles.

La plantación y regeneración de bosques tienen un importante efecto en los rendimientos hídricos de las cuencas al aumentar los niveles de la intercepción y la transpiración (Anderson et al. 1976). De acuerdo a Lassen (1964), el efecto de la reforestación sobre la producción

de agua dependerá de la cubierta vegetal presente, de la profundidad del suelo y de los hábitos de las especies vegetales plantadas o sembradas. Si la superficie no tiene cubierta vegetal protectora y la cantidad de escurrimiento superficial es alta, el reforestar reduce la producción de agua. La reforestación aumenta los niveles de infiltración, provocando que una menor cantidad de agua forme parte del escurrimiento, lo que conduce a un mayor almacenaje de agua para su posterior evaporación o transpiración.

En estudios realizados en las pequeñas cuencas experimentales Cowetta 17 y Cowetta 1 en Estados Unidos, Swank y Douglas (1974), citados por Anderson et al. (1976), determinaron que la reforestación puede causar una reducción sustancial en el flujo de cauce explicado por el incremento en la intercepción producido por el crecimiento de la plantación de coníferas. En tanto que Trimble et al. (1987) y Trimble y Wenich (1987), indican que una reforestación del 10 a 28% de la superficie de 10 grandes cuencas estadounidenses durante el período 1919-1967, produjo una disminución de 30 a 100 mm en la producción de agua. Estos mismos autores señalan, además que esta reducción tiende a ser mayor en los años secos.

En algunos casos la regeneración de los rodales puede disminuir la cantidad de flujo de cauce a niveles menores que los que tenían los rodales maduros reemplazados. Este es el caso del bosque de *Eucalyptus regnans* en Victoria, Australia, donde Borg y Stoneman (1991), determinaron que debido a la presencia de un horizonte arcilloso a poca profundidad, por encima del cual fluye el agua, las plantas jóvenes de *E. regnans* consumieron el agua más rápidamente

debido a que los árboles jóvenes necesitan un menor esfuerzo para extraer el agua y una menor resistencia para llevar el agua a las hojas.

En general, la regeneración y la plantación revierten los efectos que la corta de árboles tiene sobre la producción de agua, el flujo de tormenta, la erosión y la sedimentación. De acuerdo a Anderson et al. (1976), la tasa de reducción en la producción de agua depende en particular de la tasa de crecimiento de la nueva vegetación arbórea y herbácea. Por otra parte, la plantación de áreas no forestadas puede tener un efecto mucho más grande que la reforestación, esta diferencia radica principalmente en el grado de protección de la cobertura anterior y del uso del agua disponible para la evapotranspiración. Además, según Bell et al. (1990), la reforestación reduce los niveles de la agua subterránea en comparación con un área de pastizales. La magnitud de esta reducción depende del grado de reforestación del área clareada.

3.4 Cambio de especie.

Las especies vegetales presentan diferencias en cuanto a los aportes hídricos realizados sobre una cuenca. Por esto la conversión de la vegetación en una cuenca puede tener efectos hidrológicos importantes. Se ha observado que uno de los procesos de cambio más importantes y comunes es el reemplazo de los bosques de latifoliadas por bosques de coníferas. El efecto del cambio de especies latifoliadas por coníferas ha quedado de manifiesto en varios estudios. En la cuenca Cowetta de EE.UU. Gholz et al. (1990), indican que dos sub-cuencas reforestada con *Pinus strobus* redujeron en 250 mm la cantidad de agua después de 13 años en

comparación con el bosque original de latifoliadas. La reducción fue atribuida a las mayores pérdidas por intercepción causadas por el follaje siempre verde de los pinos y por diferencias en la estructura del dosel. Por otra parte, en una recopilación realizada por Bosch y Hewlett (1982), se indica que en la cuenca White Hollow de EE.UU. al reemplazar el 34% de un bosque de latifoliadas por coníferas no se detectaron cambios en la producción de agua. Sin embargo, en la cuenca Sage Brook de EE.UU., al reemplazar el 47% se produjo una reducción de 75 - 152 mm en 16 años. La misma situación se presentó al reforestar con pinos el 70% de la cuenca Coshocton de EE.UU., produciendo una disminución de 135 mm en 16 años.

En Australia diversos estudios comparativos demuestran que la conversión del bosque natural de eucalipto por *Pinus radiata* D. Don provocó una disminución en la producción de agua. Estos cambios se habría debido a la mayor cantidad de agua que puede interceptar el pino (Feller, 1981; Pilgrin, 1982; Tsykim, 1982).

En un estudio realizado por Dons (1987), en tres cuencas cercanas de Nueva Zelanda, siendo la primera de pastizales, la segunda de *Pinus radiata* y la tercera de bosque nativo (*Podocarpus* sp. y latifoliadas mixtas), alcanzaron 543, 254 y 339 mm de flujo de agua, respectivamente. El autor indica que la variación encontrada en los flujos de agua puede ser atribuida a diferencias en las precipitaciones y densidad de drenaje más que a diferencias hidrológicas entre especies.

En Chile, en un estudio comparativo realizado en la zona de Valdivia Huber (1991), encontró, para el período Septiembre 1988 - Abril 1989, mayores niveles de evapotranspiración en un bosque de *Pinus radiata* D. Don (1057 mm) que en un bosque nativo de Olivillo (430 mm). El autor concluye que la reforestación de grandes extensiones de superficie con esta especie debe reducir las reservas de agua del suelo y los montos de percolación.

Otro proceso de cambio importante es el reemplazo de cubiertas de matorrales y pastizales por plantaciones de árboles. En Tarawera, Nueva Zelandia una plantación de *Pinus radiata* D. Don que ocupó el 28% de una cuenca de matorral nativo produjo una reducción de 10,9 m/s (31,5%) en los caudales medios, en un periodo de 17 años. La misma situación fue observada en la cuenca Tierkloof de Sudafrica (Dons, 1986). Sharda et al. (1988), indican que el cambio del 58% del área de pastos naturales por *Eucalyptus globulus* en la cuenca Dotacamund B de la India provocó una reducción media de 87 mm (24%) en 10 años. Las máximas reducciones producidas por las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en el flujo total y flujo base ocurrieron durante los meses de Julio - Noviembre.

El impacto producido por el cambio en el uso del suelo en la cuenca Houille de Bélgica fue simulado por medio de un modelo hidrológico desarrollado por Bultot y Dupriez (1976a, b). Se compararon cubiertas de coníferas, latifoliadas deciduas, pastizales, cereales de invierno, cereales de primavera, maíz y remolacha. Las diferencias más grandes correspondieron a las cubiertas de coníferas y las cubiertas de pastizales, con registros de

evapotranspiración media anual efectiva máximo para las coníferas (552 mm/año) y mínimo para los pastizales (477 mm/año), en tanto que el flujo medio anual fue el mínimo en las coníferas (556 mm/año) y el máximo en los pastizales (631 mm/año) (Bultot et al. 1990).

3.5 Cantidad de producción de agua.

El efecto de la modificación de la cubierta vegetal en la producción de agua ha sido investigado desde principio de siglo, usando para ello cuencas experimentales pareadas, las que cuentan con control climático (un período de calibración y una cuenca control) y cuencas que han sufrido cambios en su cobertura vegetal a través de los años sin la mediación de un experimento. La Tabla 10 nos entrega un resumen de las experiencias y observaciones realizadas alrededor del mundo con respecto a las variaciones en las cantidades de producción de agua después de diferentes tipos e intensidades de tratamiento, ésta nos entrega los máximos cambios en la producción de agua ocurridos en cuencas hidrográficas de todo el mundo para los primeros año después de realizada la modificación en la vegetación.

Con los registros de la Tabla 10 se generaron las Figuras 2, 3 y 4, las que entregan los máximos cambios en producción de agua, después de una variación de la densidad vegetal en especie coníferas, latifoliadas y eucaliptos, respectivamente.

TABLA 10. Cambios en la producción de agua como resultado de una alteración de la vegetación en cuencas hídricas.

Nº	Cuenca	Área (ha)	Vegetación y suelo	Precipitación media anual (mm)	Flujo (mm)	Tratamientos	Cambios en producción de agua (mm)	Cita
1	K2 Japón	3	60% Latifoliadas 40% Coníferas	2641	2075	1947-48, 100% cortado regeneración eliminada	106 mm, incremento promedio en 5 años	Nakano* (1971)
2	K2 Japón	3	60% Latifoliadas 40% Coníferas	2641	2075	Regeneración quemada	103 mm, promedio	Nakano * (1971)
3	HJAndrews 1 USA	96	<i>Pseudotsuga Menziesii</i>	2388	1376	1962-65, 100% corta y quema	462,457,450, 390 mm incremento	Rothache (1970) * Harr * (1976) (1979)
4	HJA 6	13	<i>Pseudotsuga Menziesii</i>	2150	1290	1974, 100% cortado	425,390,325, 290, 180mm de incremento	
5	HJA 10	9	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2330	1650	1974, 100% cortado	195,310,400, 65 mm de incremento	
6	Coweeta 13 U.S.A.	16	Latifoliadas mixtas, suelos graníticos	1900	889	1940, 100% cortado sin remoción	362,275,281, 255, 198 mm de incremento	Swift y Swank* (1980)
7						1963 repetición del experimento	375,218,130, 100,70 mm de incremento	Swank y Helvey * (1970)
8	Coweeta 37	44	Latifoliadas mixtas, suelos graníticos	2244	1583	1963, 100% cortado, sin remoción con regeneración	255,100,85,0 ,26, 100,75 mm de incremento	Swift y Swank * (1980)
9	Coweeta 17	14	Latifoliadas mixtas, suelos graníticos	1895	775	1941, 100% cortado, regeneración cortada 100% plantada con pinos	414,337,231, 160, 228 mm de incremento 248 mm reducción máxima relativa a latifoliadas y 662mm relativa al suelo desnudo	Swank y Miner * (1980) Jonhson* y Kovner (1954) Swank y Douglas* (1974)
10	WI + 2	18	Bosque tropical lluvioso	3341	1950	100% cortado quema de la vegetación secundaria	397,522,89 mm de incremento	Malmer (1992)
11	W 4	17	Bosque tropical lluvioso	3341	1950	100% cortado sin quema	197,170,80 mm de incremento	Malmer (1992)

27	N.D. A USA	5	Chaparral marginal	452	34	100% controlado con quimicos	Sin efecto	Hibbert (1979) *
28	N.D. C USA	5	Chaparral marginal	452	43	100% controlado con quimicos	13mm de incremento medio en 17 años	
29	B. Creek 1 USA	124	<i>Juniperus spp.</i> suelo arcilloso	457	20	100% cortado con cables	Sin cambio	Hibbert * (1979)
30	W.W. Gap USA	91	<i>Populus spp.</i> y coníferas	526	157	100% cortado con regeneración	34,47,25,22, 21y 13 mm de incremento	Reinhart et al (1965)*
31	Andrew HJA- 6 USA	13	<i>Pseudotsuga menzie- sii</i> , suelos profundos	2190	1430	100% cortado	380mm de incremento medio 4 años	Harr et al (1981) *
32	HJA-7	15.4	<i>Pseudotsuga menzie- sii</i> , suelos profundos	2190	1210	60% del área basal cortada	200mm de incremento medio 4 años	Harr et al (1982)
33	Beaver C. 12 USA	184	<i>Pinus ponderosa</i> suelo volcanico de lm. de profundidad.	617	150	100% cortado	140mm incremento máximo	Baker (1986)
34	N.W. Virginia USA		Latifoliadas mixtas	1450	750	100% cortado	250 mm de incremento	Patric y Reinhart (1971)
35	Maimai M7 Nueva Zelandia	4.14	<i>Nothofagus spp.</i> <i>Podocarpus spp.</i> y otras.	2600	1500	100% cortado, quema para plantar <i>Pino radiata</i>	650 mm de incremento	Perarce et al (1976)*
36	Wights Australia	94	<i>Eucalyptus marginata</i>	1200		100% cortado	239 mm de incremento medio anual	Ruprecht y Schofield (1989)
37	Sn Suecia	40	<i>Picea abies</i> y <i>Pinus silvestry</i> suelo limoso	732	246	100% cortado remoción de desechos	406mm de incremento máximo y 371mm medio	Rosen (1984)
38	Minamita Japon	23	Bosque natural de Akanasu y roedal artifi- cial de Hinoki	1153	293	100% cortado	209 mm de incremento	Nakano (1971)*
39	Kitatani Japon	17	Bosque natural de Akanasu y roedal artifi- cial de Hinoki	1113	290	100% cortado	205mm de incremento	
40	McCree USA	514	<i>Pinus ponderosa</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i> suelo arenoso margoso	579	112	100% quemado	91mm de incremento	Helvey (1973) (1980)*
41	Burns USA	563	<i>Pinus ponderosa</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i> suelo arenoso margoso	597	155	100% quemado	74mm de incremento	

42	Fox USA	473	<i>Pinus sp. Pseudotsuga menziesii</i> suelo arenoso margoso		175	100% quemado	112mm y 472mm en un año muy humedo	
43	P. County WSC USA	5	<i>Quercus sp</i> suelo arcilloso	635	145	99% cortado	111,154 y 75mm de incremento	Lewis (1968)*
44	Breslevlei S. Africa	27	Matorral esclerófilo	1400	660	98% reforestado con <i>Pinus radiata</i>	313 mm de reducción media en 15 años, 400mm máxima	Van Wyk (1977)*
45	Fernow 3 USA	34	Latifoliadas mixtas, suelo limoso	1500	607	91% cortado	253, 85, 60 y 80 mm de incremento	Patric (1980)*
46	Kamitata Kitata Japon	645	65% latifoliadas 35% coníferas	1438	808	90% cortado	164mm de incremento medio en 2 años	Nakano (1971)*
47	Bear Creek USA	53	<i>Pinus sp.</i> y latifoliadas suelo arenoso			66% cortado, quema y plantación	297, 244 y 91mm de incremento	Batson (1979)*
48	Crowea Australia	114	86% de <i>Eucalyptus diversicolor</i> 14% de <i>Eucalyptus marginata</i>	1101	130	Corte del 86% del E. <i>diversicolor</i> y corta de 14% selección de <i>E. marginata</i>	113, 301, 174, 171, 322, 99 y 120 mm de incremento	Borg et al (1988)
49	Poole Australia	121	<i>Eucalyptus diversicolor</i>	1069	56	75% cortado 25% corta de selección con quema y plantación	46, 291, 170, 247, 367, 95, 95 y 120 mm de incremento	Borg et al (1988)*
50	Fernow 1 USA	30	Latifoliadas mixtas, suelo limoso con piedras	1524	584	85% del área basal cortada y regeneración	130, 86, 89 mm de incremento	Patric (1980)*
51	Rinbaud	146	<i>Pinus sp.</i> junto con un bosque degradado			85% de la superficie quemada	130 mm, 30% de incremento	Lavabre et al (1993)
52	Cathedral Peak Sudafrica	142	Pastizales "themeda"	1400	650	84% forestado con <i>Pinus patula</i>	13 mm de reducción	Nanni (1970)* Bosch (1979)*
53	Lambrechts S. Africa	65	Matorral esclerófilo	1451	460	84% forestado	Sin cambio significativo	Van Wyk (1977)*
54	Workman Creek USA	129	Pino ponderosa suelo arcilloso profundo	813	87	83% clareado 17% raleado plantación de coníferas	93 mm de incremento medio 320 mm máximo	Rich y Gottfried (1976)* Hibbert (1979)*
55	W. Branch USA	71	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Alnus</i> suelo arenoso	2483	1885	82% cortado y quemado, 5% de caminos	370, 520, 615 y 530 mm de incremento	Harr (1976)* (1979)*
56	Beaver Creek 3 USA	146	<i>Juniperus sp</i>	457	18	83% cubierta eliminada con herbicidas	10, 30, 14 mm incremento	Hibbert (1979)*

57	Coweeta NC USA	9	Latifoliadas mixtas, suelos graníticos	1854	838	80% cortado para pastizal	265mm de incremento relativo a latifoliadas	Dato no Publicado (1979)*
58	Yerranimu Australia		<i>Eucalyptus marginata</i>	850		70-10% reducción de copas	20mm de incremento medio 38 mm máximo	Ruprecht y Schofield (1989)
59	Havsen Australia		<i>Eucalyptus marginata</i>	1340		80% del área basal raleada	40mm de incremento	Stoneman Schofield (1989)
60	Beaver Creek 17 USA	12	Pino ponderosa	726	206	77% clareado	116mm de incremento máximo	Baker (1986)
61	Lewin South USA		<i>Eucalyptus marginata</i>	1220		75% reducida el área basal	incremento 116mm medio 178mm máximo	Stoneman Schofield (1989)
62	Pine Tree Branch USA	36	26% Latifoliadas mixtas, suelo franco arenoso	1230	255	75% reforestado con <i>Pinus sp.</i>	72-152mm de reducción en 16 años	T.V.A. (1961)*
63	Maimai M9 Nueva Zelandia	9	<i>Nothofagus sp.</i> <i>Podocarpus sp.</i> suelo limoso	2600	1500	75% cortado con quema	540 mm de incremento	Pearce et al (1980)*
64	Florida B USA	49	<i>Pinus sp.</i>	1400	260	73% cortado con quema de restos	150, 0, 30mm de incremento	Riekerk (1989)
65	Cathedral Peak SudAfrica	190	Pastizales	1400	650	75% reforestado con <i>Pinus patula</i>	257 mm media de reducción en 22 años y 440mm máxima	Bosch (1979)*
66	Workman Creek USA	100	P. ponderosa suelo arcilloso	813	86	73% clareado, quema de residuos	48,130,100,80,25mm de incremento	Hibbert (1979)*
67	Coshocton 16 USA	18	30% latifoliadas suelo limoso	771	300	70% reforestado con <i>Pinus sp.</i>	135mm de reducción en 16 años	Harrold et al (1972)*
68	Balingup Australia	93	80% pastizales 20% <i>Eucalyptus marginata</i> , suelo arenoso	771	142	63% plantado con <i>Pinus radiata</i> y 7% con eucalipto	75mm media de reducción en 6 años, 146 mm máxima	Borg et al (1988)
69	Yarraquil Australia		<i>Eucalyptus marginata</i>	1120		68% del área basal cortada	17mm media de incremento 31mm máximo	Ruprecht y Schofield (1989)
70	Beaver Creek USA	102	Pino ponderosa suelo de origen basáltico	703	135	68% cortado en fajas y raleado	72, 62, 51mm de incremento	Baker (1986)
71	Kn Suecia	150	<i>Pinus sylvestri</i> <i>Picea abies</i>	732	271	70% cortado	274mm de incremento	Rosen (1984)
72	April Nort Australia		<i>Eucalyptus marginata</i>	1070		65% reducida la cobertura, regeneración	104mm media de incremento 155mm máximo	Ruprecht y Schofield (1989)
73	March Rd Australia		<i>Eucalyptus marginata</i>	1070		65% cortado y regenerado	121mm media de incremento, 196 mm máximo	Ruprecht y Schofield (1989)

74	Caspar Creek USA	424	<i>Sequoia sempervirens</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i> , suelos graníticos	1200		67% cortado	15% media de incremento en 9 años	Keppeler y Ziemer (1990)
75	Maselle River USA	14245	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Tsuga</i> sp. suelo franco arcilloso	3300	2690	64% del área basal cortada, 2% anual con regeneración	Sin cambio detectable	Martin y Tinney (1962)*
76	Three Bar USA	19	Chaparral, suelo granítico grueso	582	11	60% tratado químicamente	52mm media de incremento en 5 años	Hibbert (1979)*
77	Sacandaga River USA	127200	Latifoliadas y coníferas, suelo arenoso	1143	770	60% aumento del área basal	196mm de reducción en 38 años	Eschner (1965)*
78	HJAndrew India	21	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2150	1290	60% cortado	200,240,180, 55 mm de incremento	Rothacher (1979)* Harr (1979)*
79	Optacamu nd India	32	Pastos naturales suelo franco	1535	364	58% del área plantada con <i>Eucaliptus globulus</i> .	87mm media de reducción en 10 años	Samraj et al (1988)
80	Beaver Creek 14 USA	546	<i>P. ponderosa</i> suelo franco arcilloso	650	117	57% cortado en fajas	60mm máximo de incremento	Baker (1986)
81	Schacklan Brook USA	808	Latifoliadas mixtas, coníferas	1030	627	58% plantado con coníferas	130mm de reducción en 24 años	Schneider y Ayer (1961)*
82	Bosbouklo S. Africa	200	Matorral esclerófilo	1390	590	57% plantado con <i>Pinus radiata</i>	270mm de reducción en 23 años	Van Wyk (1977)*
83	Lemon Australia		<i>Eucalyptus marginata</i>	800		54% cortado	17mm media y 38 mm máximo de incremento	Ruprecht y Schofield (1989)
84	Coweeta 41 USA	29	Latifoliadas, suelos graníticos	2029	1285	53% del área basal cortada	55mm media de incremento	Johnson y Kovner (1956)*
85	Palmer Creek USA	1800	<i>Pinus</i> sp. <i>Picea</i> sp.	750	350	50% quemado	84mm de incremento	Swanson y Hillman (1977)*
86	Takaragawa S Japon	118	60% latifoliadas 40% coníferas	2153	1783	50% extraído por corta de selección	199mm media de incremento en 6 años	Nakano (1971)*
87	Coweeta NC USA	34	Latifoliadas suelos graníticos	2068	1275	50% muertos por veneno en fajas de 10m	189,155,130, 112 y 100mm de incremento	Hewlett y Hibbert (1961)*
88	Fernow 7 USA	24	Latifoliadas suelo limoso	1469	788	50% cortado, parte alta de la cuenca	155, 145mm de incremento	Patric (1980)*
89	Fernow 7 USA		Latifoliadas suelo limoso			50% cortado, parte baja de la cuenca	251,261mm de incremento	Patric (1980)*

90	Fernow 7 USA	6	Latifoliadas suelo limoso	1440	49	50% cortado, parte baja de la cuenca, control de regeneración	165, 142mm de incremento	Patric (1980)*
91	Fernow 7 USA		Latifoliadas suelo limoso	1440	49	50% cortado, parte alta de la cuenca	259mm de incremento	Patric (1980)*
92	Bear Creek XF USA	53	<i>Pinus sp.</i> , latifoliadas, suelo arenoso fino	1397		30% cortado		Patric (1980)*
93	Coyote Creek 1 USA	69	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , otras con- íferas suelo pedregoso	1230	62	50% del área basal cortada, 2% caminos	60mm media de incremento en 5 años	Harr et al (1979)*
94	Alberta H Canada	97	<i>Picea sp.</i> Lodgepole pine	520	14	50% cortado en fajas	40mm media de incremento	Swanson Hillman (1977)*
95	Florida A USA	67	<i>Pinus. Elliottii</i>	1400	26	49% cortado dejando residuos y plantación	30,40,0,100, 180, 30,-130 mm de incremento	Riekerk (1989)
96	Alum Creek WS USA	1	Latifoliadas <i>Pinus sp.</i> suelo margoso y pedregosa	1333	15	45% raleado, regeneración eliminada con herbicidas	107,58,89,58 mm de incremento	Rogerson (1979)*
97	Sage Brook USA	181	Latifoliadas y coníferas	974	53	47% plantada con coníferas	106mm de reducción en 26 años	Schneider y Ayer (1961)*
98	South F. USA	129	<i>Pinus ponderosa</i> suelo arcilloso	813		45% del área basal cortada	Incremento signifi- cativo en años húmedos	Hibbert (1979)*
99	Fool Creek USA	299	Lodgepole pine <i>Picea abies</i> , suelo gran- ítico	762	28	40% cortado en fajas	109,147,89,7 6,91mm de incremento	Troendle y King (1985)
100	Tree Bar B USA	19	Chaparral suelo graní- tico	582	1	40% tratado quimicamente	30mm media de incremento	Hibbert (1979)*
101	Fool Creek USA	299	Lodgepole pine <i>Picea abies</i> , suelo gran- ítico	762	28	40% cortado en fajas	74mm media de incremento	Troendle y King (1985)
102	Colorado USA		Lodgepole pine <i>Picea abies</i> ,	750	27	47% del área basal cortada	82,130,92,11 5mm de incremento	Godell (1958)*
103	Dons Australia		<i>Eucaliptus. Marginata</i>	800		38% cortado en fajas y en bloques	11mm media de incremento, 38mm máximo	Ruprecht y Schofield (1989)
104	Tierkloof S. Africa	157	Matorral esclerófilo	1809	1100	36% plantado con <i>Pinus radiata</i>	130mm de reducción en 8 años	Van Wyk (1977)*
105	Fernow USA	15	Latifoliadas mixtas	1500	660	39% del área basal cortada	64,36mm de incremento	Patric y Reinhart (1971)*

106	Kericho S Kenya	688	Vegetación de alta montaña y bambu	1905	416	34% clareado	103mm de incremento	Pereira (1962) (1964)*
107	Cold Spring USA	391		1030	616	35% plantado con coníferas	172mm de reducción en 24 años	Schneider y Ayer (1961)*
108	White Hollow 694	694	Latifoliadas 35% Coníferas	1184	460	34% del área reforestada	No hay cambio detectable	TVA (1961)*
109	Beaver Creek B USA	730	Pino ponderosa suelo de origen basáltico	679	174	33% cortado	70,61,52,42,32,23 mm de incremento	Baker (1986)
110	Welbucket Australia			700		32% del área basal cor tada, regeneración	2mm media de incremento 3mm máximo	Ruprecht y Schofield (1989)
111	North Fort WC USA	100	Pino ponderosa suelo arcilloso	813	86	32% clareado	13,51,15,48,30mm de incremento	Hibbert (1979)*
112	Beaver Creek 9 USA	454	Pino ponderosa suelo de origen basáltico	654	155	31% cortado en fajas con raleo	25mm media de incremento 174mm máximo	Baker (1986)
113	HJ Andrews 3 USA	101	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Tsuga</i> sp, suelo arcilloso	2388	1346	30% cortado	150,163,254,297, 226mm de incremento	Harr (1979)*
114	Coweeta NC 10 USA	86	Latifoliadas suelos graníticos	1854	1072	30% del área basal cortada	25mm media de incremento	Johnson y Kovner (1956)*
115	Hubbard B USA	35	Latifoliadas suelo granítico			30% cortado en fajas	200,500mm de incremento	Hornbeck (1975)*
116	Camp Creek USA	3390	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Pinus</i> sp. suelos francos.	600	140	30% del área cortada	10,3,23,7,14,9,46,5,58,6,18,6mm de incremento	Cheng (1989)
117	Coyote Creek 2 USA	68	<i>Pseudotsuga menziesii</i> y coníferas mixtas suelo gravoso			30% cortado en parches 2% de caminos los desechos eliminados	38,110,119,82,80mm de incremento	Harr et al (1979)*
118	White River USA	197400	<i>Tsuga</i> sp. <i>Picea</i> sp.					
119	Tarawera N.Zeland	90600	Chaparral y matorral nativo	2000	34.6 m3/s	28% del área plantada con <i>Pinus radiata</i>	10.9m3/seg de reducción en 17 años	Dons (1986)
120	Coweeta NC 19 USA	20	Latifoliadas suelo granítico	1946	1052	27% del área basal cortada por corta selectiva	Sin cambio significativo	Johnson y Kovner (1956)*
121	Oconee M USA	764000	Cultivo agrícola suelo originado de rocas igneas	1265	402	27,5 del área reforestada	61mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)

122	Ocmulgee USA	580000	Cultivo agrícola suelo originado de rocas igneas	1260	432	27,5% de la cuenca plantada con coníferas	38mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)
123	Flint USA	479000	Cultivo agrícola suelo originado de rocas igneas	1350	447	27,5% de la cuenca plantada con coníferas	38mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)
124	Deer Creek USA	303	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Alnus</i> sp. suelo arenoso	2474	1906	25% cortado 5% caminos	110,0,130mm incremento 150mm máximo no significativo	Harr (1976) (1979)*
125	Coweeta NC 19 USA	28	Latifoliadas suelo granítico	2001	1222	22% del área basal cortada	71,64,55,47,39 de incremento	Johnson y Kovner (1956)*
126	Oconee 6 USA	282000	Cultivos agrícolas	1280	465	21,3% de la cuenca reforestada	94mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)
127	Cabin Creek USA	212	<i>Picea</i> sp., <i>Lodgepole pine</i>	840	31	21% cortado	17mm de incremento	Trimble et al (1987)
128	Chattahoochee USA	919500	Cultivo agrícola suelo originado de rocas igneas	1420	572,5	20% del área reforestada	43mm menos en 48 años	Trimble et al (1987)
129	Pennsylvania USA	43	<i>Quercus</i> sp.	925	325	20% del área basal cortada	68mm de incremento	Lynch y Sopper (1970)*
130	Fernow WV USA	36	Latifoliadas suelo limoso	1473	762	20% del área basal cortada por corta de selección	36mm de incremento	Patric (1980)*
131	Leading Ridget WS USA	43	Latifoliadas suelo limoso	1004	324	20% inferior de la cuenca cortado	68mm de incremento	Patric (1980)*
132	West Fork USA	364	Pino ponderosa suelo derivado de rocas igneas	639	71	16.6% cortado remanente raleado	10,36mm de incremento	Rich (1972)* Rich y Thomson (1974)*
133	Savannah USA	1945000	Cultivo agrícola suelo derivado de rocas igneas	1350	472,5	15.4% de la cuenca reforestada	56mm menos en 48 años	Trimble et al (1987)
134	White Spar B USA	100	Chaparral, suelo granítico fino	549	34	15% tratado químicamente	13mm media de incremento	Hibbert (1979)*
135	Fernow WV 5 USA	36	Latifoliadas, suelo limoso pedregoso	1473	762	14% del área basal cortada por corta de selección	Sin cambio significativo	Patric y Reinhart (1971)*
136	Fernow WV 3 USA	34	Latifoliadas, suelo limoso pedregoso	1500	607	13% del área basal cortada por corta de selección	Sin cambio significativo	Patric (1980)
137	Tallapoosa W USA	430000	Cultivo agrícola suelo derivado de rocas igneas	1385	532	11,8% de la cuenca reforestada	28mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)
138	Chattahoochee W USA	303000	Cultivo agrícola suelo derivado de rocas igneas	1545	707	11% de la cuenca reforestada	61mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)

139	Saluda C USA	650000	Cultivo agrícola suelo derivado de rocas ígneas	1300	426.5	10,5% de la cuenca reforestada	69mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)
140	Saluda S USA	420000	Cultivo agrícola suelo derivado de rocas ígneas	1335	495	9,7% de la cuenca reforestada	61mm de reducción en 48 años	Trimble et al (1987)
141	Monroe Canyon USA	354	Latifoliadas suelo limoso	648	64	1,7% cortado	6mm menos en invierno, 4mm en verano	Rowe (1963)*
142	D2-D3 Madagascar	7-39	Bosque natural	2100	730	Bosque natural	250mm menos de agua que cuenca cubierta de matorral	Beilly et al (1974)*
143	D5 Madagascar	13	<i>Eucalyptus robusta</i>	1600	700	<i>Eucalyptus robusta</i>	400mm menos que cuenca de bosque natural	Beilly et al (1974)*
144	Graceburn Australia	2500	<i>Eucalyptus sp.</i> suelo arcilloso	1460	850	Quemado y regenerado vigorosamente	240mm media de reducción en 21 años	Langford (1976)
145	Watts Australia	10300	<i>Eucalyptus sp.</i> suelo arcilloso		930	Quemado y regenerado vigorosamente	220mm media de reducción en 21 años	Langford (1976)
146	Donnelly's Australia	1430	<i>Eucalyptus sp.</i> suelo arcilloso			Quemado y vigorosamente regenerado		Langford (1976)
147	Coranderri Australia	1860	<i>Eucalyptus sp.</i> suelo arcilloso		1160	Quemado y regenerado vigorosamente	155mm media de reducción en 21 años	Langford (1976)
148	Wungong Brook Australia	14600	<i>Eucalyptus marginata</i> <i>Eucalyptus calophylla</i>	1100	190	<i>Eucalyptus marginata</i> dieback, corta y quema	Incrementos observados son atribuidos a dieback	Batini et al (1980)*
149	Iffley Australia	175	<i>Eucalyptus marginata</i>	861	89	Corta pesada de selección, quema	45,224,106,183, 197,138 y 75mm de incremento	Borg et al (1988)
150	Mooralup Australia	112	<i>Eucalyptus marginata</i>	698	7	Corta pesada de selección, quema y vigorosa regeneración	0,24-63,0 mm de variación	Borg et al (1988)
151	Chenango Forest USA		Suelo con cultivo abandonado	1143	635	7% del área plantada con coníferas, 10% plantado con latifoliadas	25mm de reducción en 42 años	Muller (1966)*
152	Kershope Forest USA	8	<i>Picea sitchensis</i>	1439	720	Explotada	259mm de incremento	Anderson et al (1990)
153	Marmot Creek USA		Coníferas			21% del área cortada en bloques	6% de aumento en 8 años	Swanson et al (1986)
154	Streeter Canada		Bosques pastizales y			50% cortado en bloques	175% de incremento	Swanson et al (1986)
155	Jack Creek USA	13000	<i>Pinus sp.</i>			35% atacada y eliminada por insectos	15% de mayor producción en 5 años	Potts (1984)
156	Lien-Hua-Chi Taiwan	5.86	Bosque subtropical	1680		Cortado	402 y 184mm de aumento en las estaciones húmedas, 46 y 20mm en las secas	Hsia et al (1986)

157	Victoria Australia	46.4	Bosque natural	1400	400	Corta, quema y reforestado con <i>Pinus radiata</i>	365,210 y 33mm de incremento	Leitch y Flinn (1986)
158	Appalachian USA	59	Bosque mixto de hoja ancha			Corta, maderero con cable y construcción de caminos	720mm de incremento en 4 años	Swsnk et al (1982)
159	Horse Creek 8 USA	148	<i>Abies grandis</i>	1070		3,7% del área cortada para caminos	Sin cambio signifi- cativo	King y Tenyson (1984)
160	Horse Creek 18	86.2	<i>Abies grandis</i>	1070		4,3% del área cortada para caminos	Sin cambio signifi- cativo	King y Tenyson (1984)
161	Horse Creek 16	28.3	<i>Abies grandis</i>	1070		3% del área cortada para caminos	Sin cambio signifi- cativo	King y Tenyson (1984)
162	Horse Creek 12	83.8	<i>Abies grandis</i>	1070		3,9% del área cortada para caminos	Incremento signifi- cativo	King y Tenyson (1984)

Fuente: Elaboración propia

" Citados por Anderson (1976)

* Citados por Bosch y Hewlett (1982)



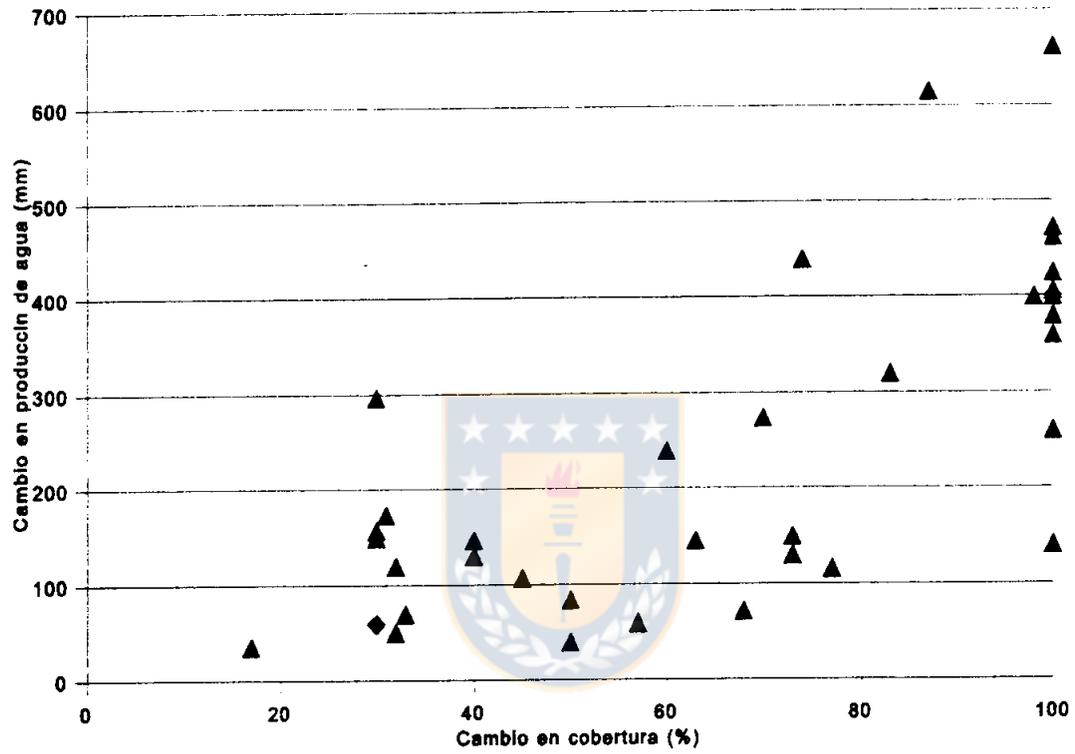


Figura 2. Producción de agua después de cambios (aumento o disminución) en la cubierta de coníferas.

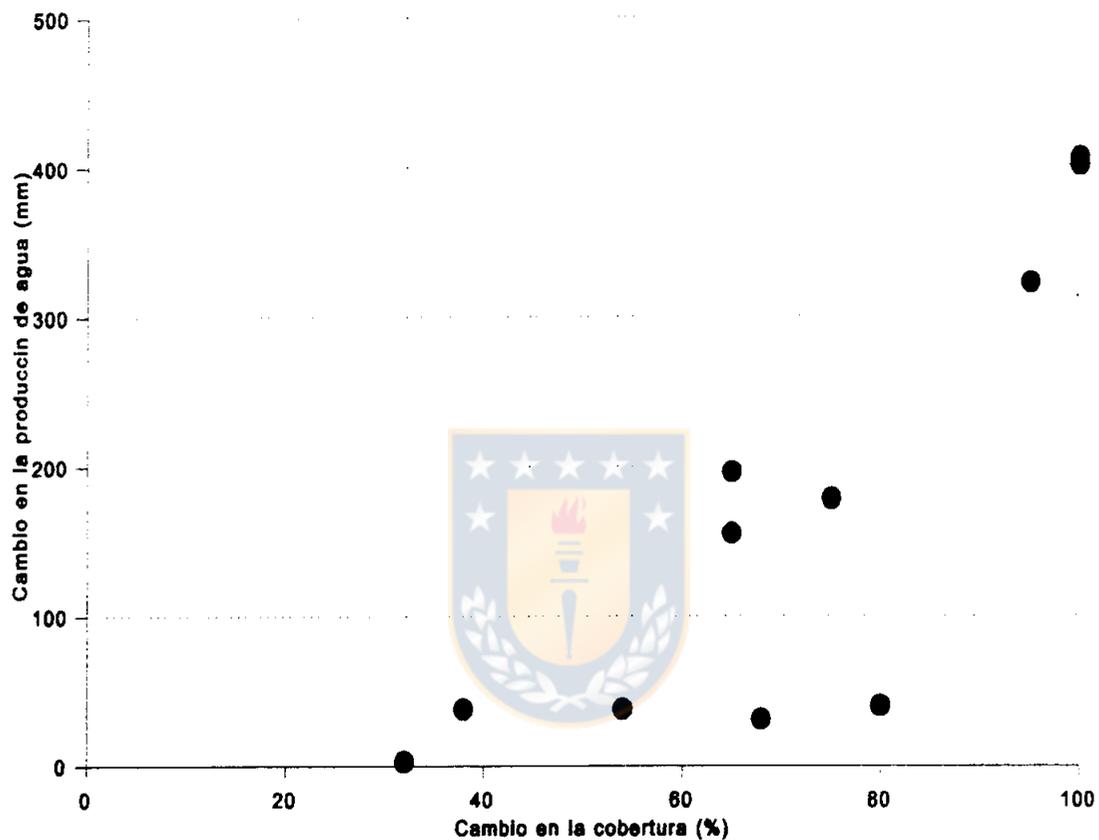


Figura 3. Producción de agua después de cambios (aumento o disminución) en la cubierta de Eucaliptos.

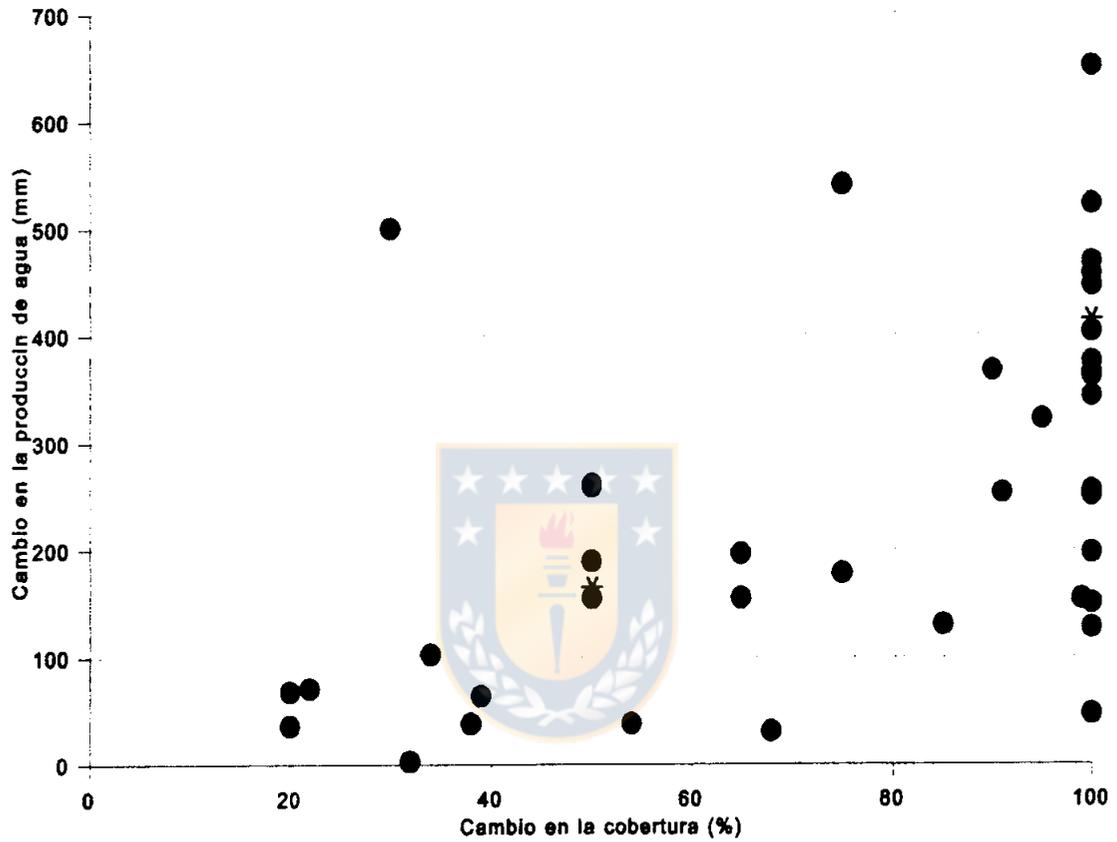


Figura 4. Producción de agua después de cambios (aumento o disminución) en la cubierta de latifoliadas.

Se observan grandes diferencias en los registros cuando se producen cambios del 100% en la cubierta vegetal, sobre todo, en el caso de las especies latifoliadas. En cambio, para las coníferas salvo un par de resultados extremos (e.g. 140 y 662 mm), la mayoría de los registros se encuentran alrededor de los 400 mm de variación en la producción de agua. Por otra parte, al cambiar el 100% de la cubierta de eucaliptos los valores registrados, salvo uno (240 mm), se encuentran en el rango 330 - 400 mm de cambio en la producción de agua.

El máximo cambio registrado en la producción de agua fue de 662 mm (85% del flujo medio anual y 35% de la precipitación), ocurrido en la cuenca Coweeta 17 de EE.UU. En tanto que el mínimo cambio vegetal que provocó una variación significativa en los flujos de agua fue de 3,9%, registrado en la cuenca Horse Creek de EE.UU. Un resultado que se debe considerar por su efecto contradictorio es el obtenido por Langford (1976), que concluyó que no hubo un incremento significativo en la producción de agua después de la quema de un rodal de *Eucalyptus regnans* y reportó una reducción en el flujo de cauce después de 5 años, cuando la regeneración se estableció fuertemente.

Los registros de la Tabla 10 están en cierta medida de acuerdo con Bosch y Hewlett (1982), los que indican que un cambio del 10% en la cubierta de coníferas y eucaliptos causan un cambio de 40 mm en la producción anual de agua. Para las latifoliadas deciduas cambios del 10% en la cubierta producen 25 mm de variación en la producción de agua. En tanto para los arbustos y pastizales este cambio produce 10 mm de variación en la producción anual de agua.

Esta investigación bibliográfica muestra que las cubiertas de coníferas, latifoliadas, matorrales y pastizales tienen, en este orden, una influencia decreciente en la producción de agua en el área en que estas cubiertas son manipuladas. De esta manera, la máxima producción de agua ocurrirá en la cubierta de pastizales y la mínima en la cubierta de coníferas.

Por otra parte, la forma que presentan las variaciones en la producción de agua son claramente explicadas por Ruprecht y Schofield (1989), los que indican que en las cuencas Wights de Australia, cubiertas con eucaliptos, el incremento del flujo de cauce en el tiempo presenta una forma característica que puede ser dividida en tres componentes; (1) un salto inicial inmediatamente después de la corta, (2) un incremento lineal para los siguientes 7 años y, (3) establecimiento de un nuevo flujo de equilibrio. Los autores indican que el salto inicial en el flujo de cauce fue atribuido al impacto inmediato de la baja en los niveles de intercepción, lo que provocó la recarga del sistema intermitente de aguas subterráneas, además, el incremento lineal siguiente fue atribuido a la expansión de la zona de descarga del sistema permanente de aguas subterráneas.

Se observa que la producción de agua como respuesta a la manipulación de la vegetación es dependiente de la cantidad de precipitación. Esto se debe a que la vegetación afecta la cantidad de precipitación que es evaporada, transpirada y en consecuencia la cantidad disponible para el almacenaje de agua en el suelo, la recarga de agua subterránea y el flujo de cauce; por esto, las zonas que presentan mayores

precipitaciones tienen cambios más grandes en la producción de agua y al contrario, las zonas de bajas precipitaciones presentan cambios de menor magnitud.

Stoneman y Schofield (1989), mostraron la relación entre el flujo de cauce y la cobertura en 6 cuencas australianas de *Eucalyptus marginata* para una zona definida como de altas lluvias (1300 - 1350 mm/año de promedio) (Figura 5). El efecto de reducción de la cobertura en el flujo de cauce fue claro y dramático; se registraron incrementos de 237 mm (13.2% de la lluvia) por la reducción de la cobertura de 50 a 20%. La misma relación y con la misma especie fue realizada por los autores para una zona definida como de lluvias intermedias en 13 subcuencas de la cuenca Yarragil Brook (Figura 6). Se registró un incremento de 115 mm (11,5% de la lluvia), al reducir la cobertura del dosel desde 50 a 20%.

Los registros de las máximas variaciones en la producción de agua para las especies coníferas presentes en la Tabla 10, se dividieron en zonas de precipitación alta (más de 1500 mm/año), intermedia (900 - 1500 mm/año) y baja (menos de 900 mm/año) (Figuras 7, 8 y 9). Se observa claramente en estos gráficos que los máximos registros se encuentran en la zona de altas precipitaciones.

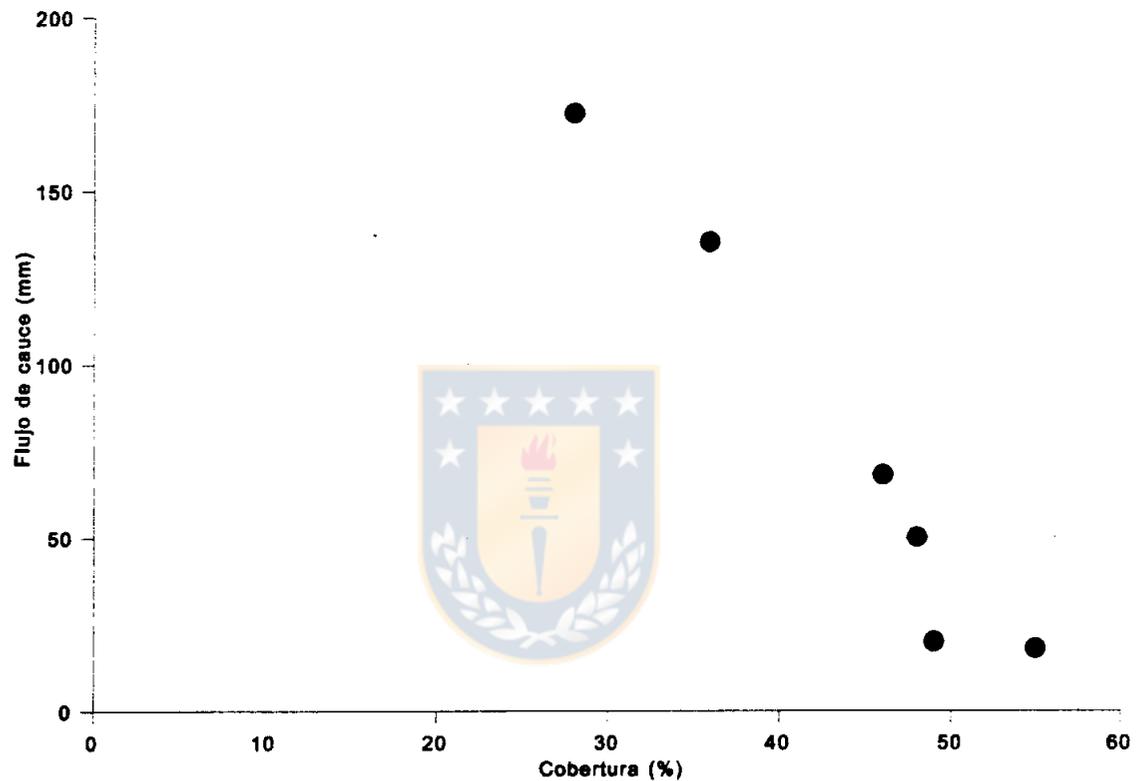


Figura 5. Relación entre la cobertura del dosel (%) y el flujo de cauce (mm) para 6 cuencas en una zona de altas precipitaciones para *Eucalyptus marginata*.

$$Y = 371 - 6,678X \quad r^2 = 0,94$$

Fuente: Stonemann y Schofield (1989)

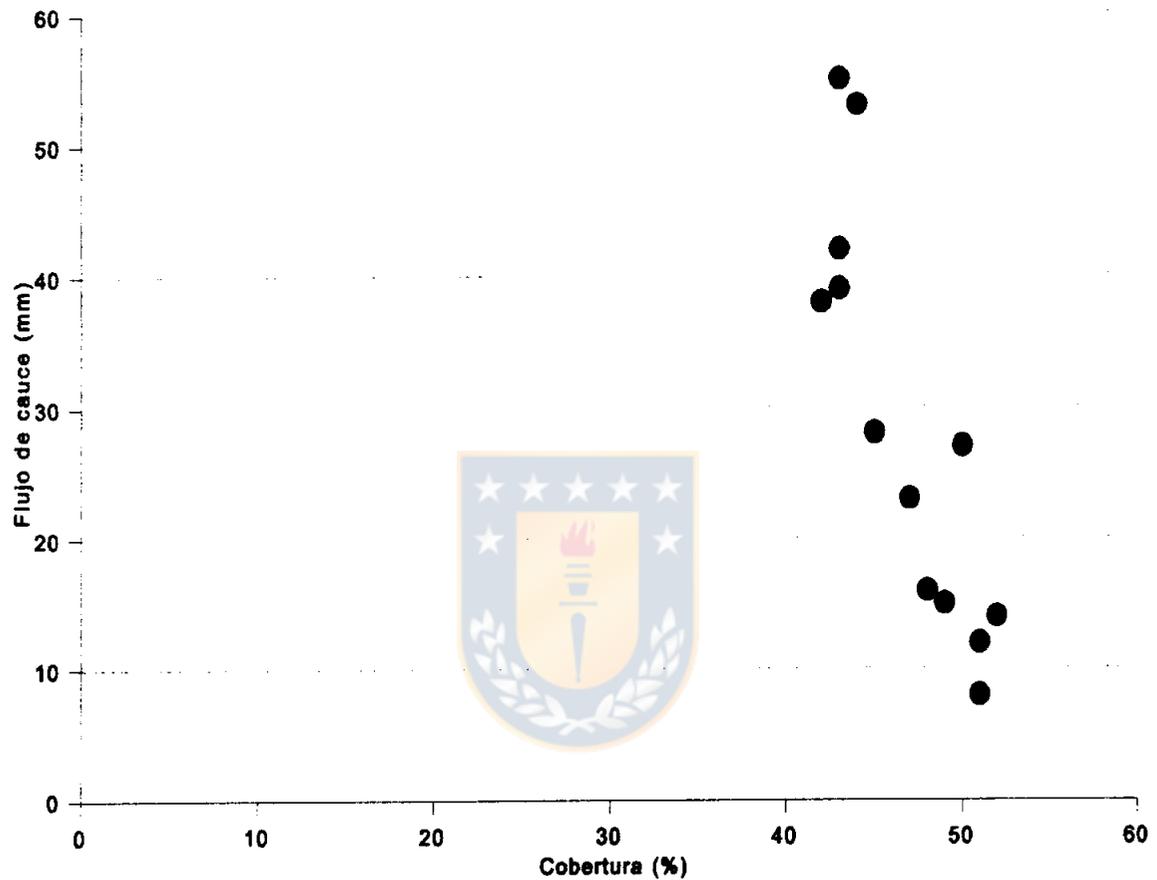


Figura 6. Relaciones entre la cobertura del dosel (%) y el flujo de cauce (mm) para 13 subcuencas de la cuenca Yarragil en la zona intermedis de lluvias en un bosque de *Eucalyptus marginata*.

$$Y = 208 - 3,83X \quad r^2 = 0,75$$

Fuente: Stonemann y Schofield (1989)

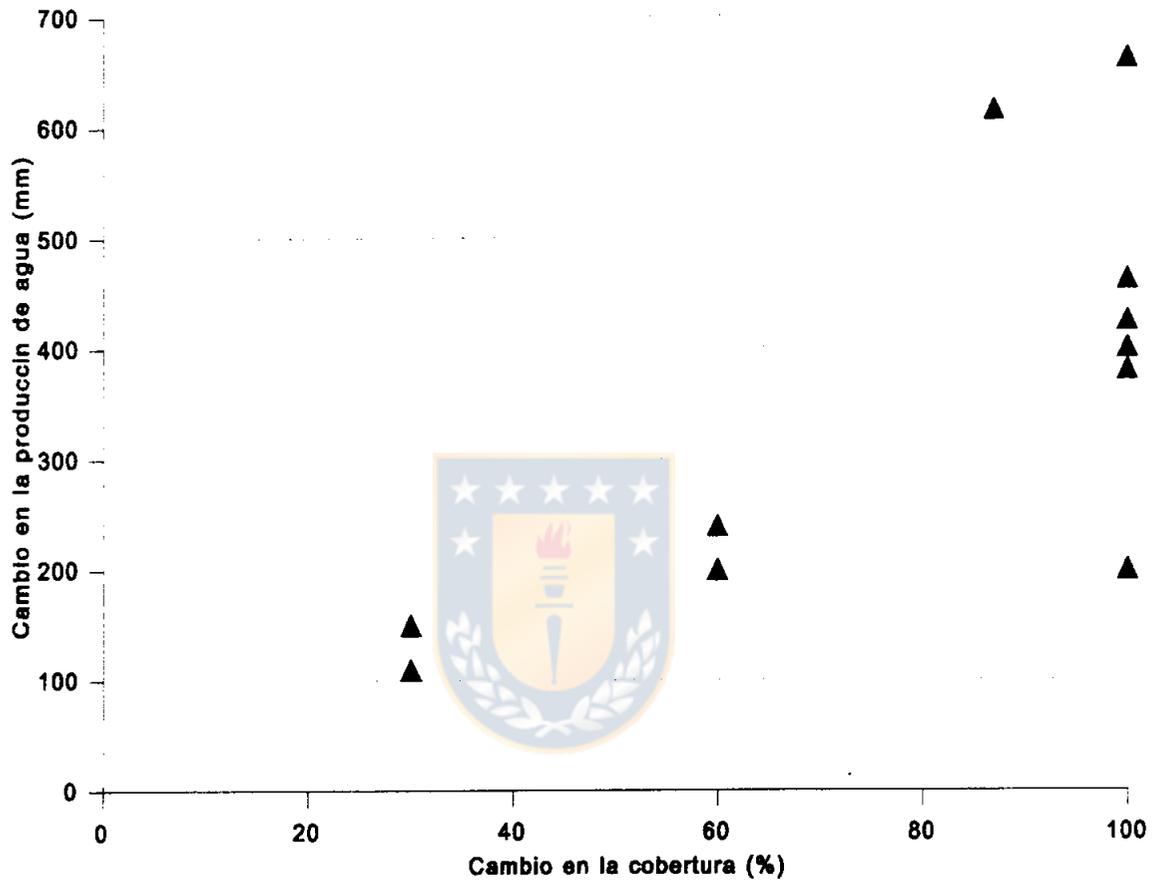


Figura 7. Cambio en la producción de agua después de una variación en la cubierta de coníferas. Zona de altas precipitaciones.

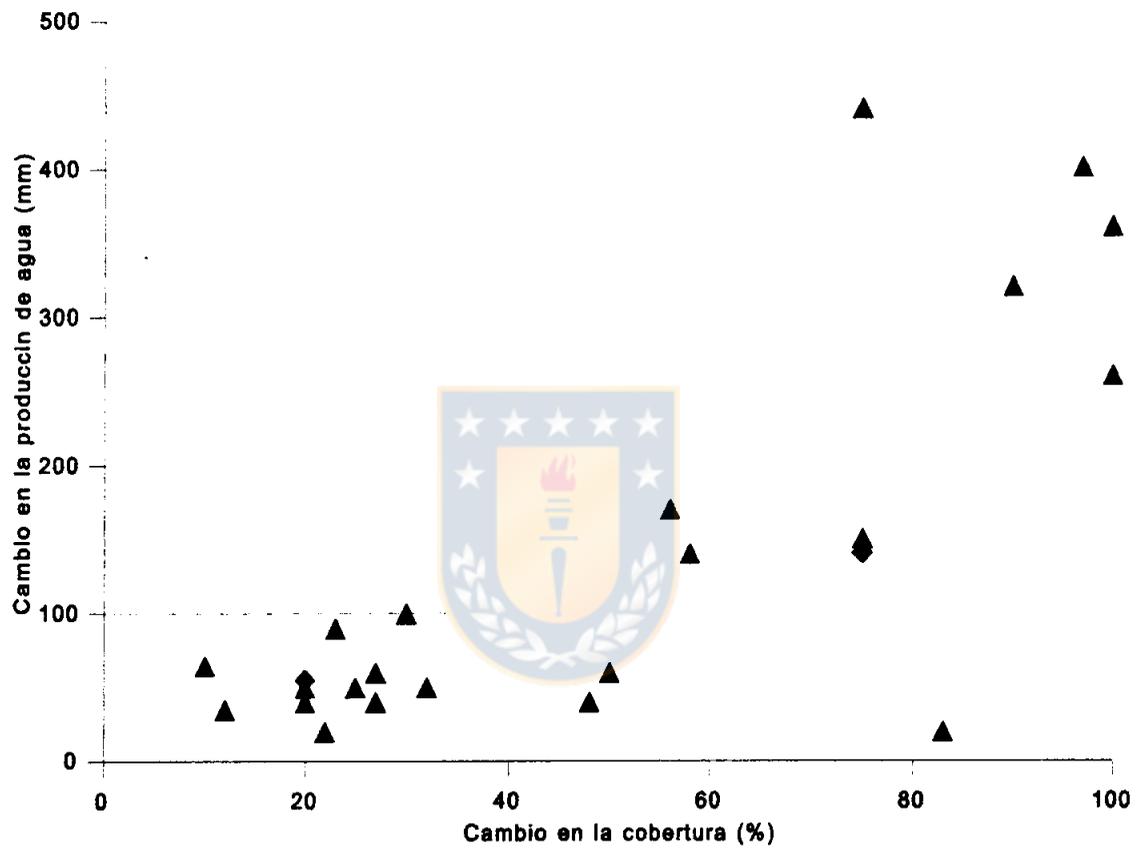


Figura 8. Cambio en la producción de agua después de una variación en la cubierta de coníferas. Zona intermedia de precipitaciones.

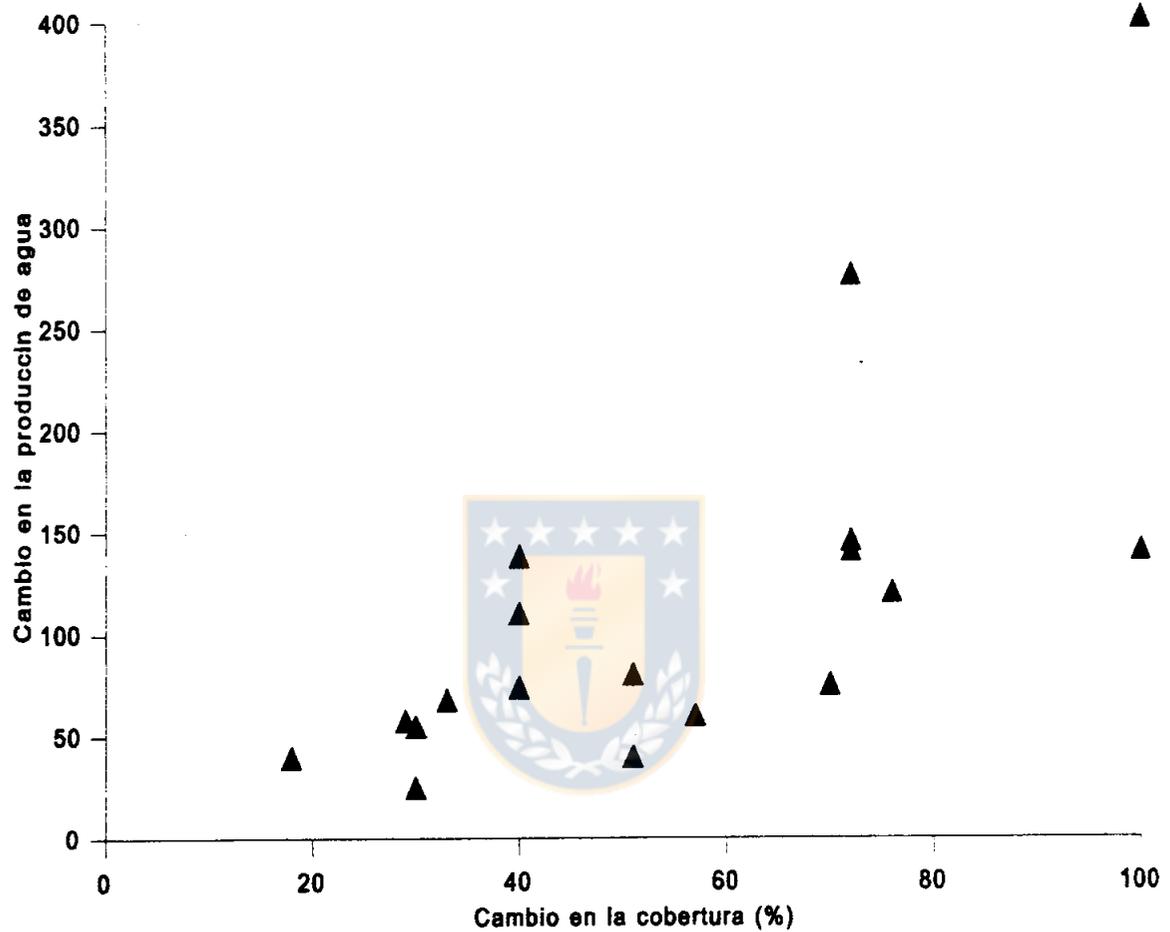


Figura 9. Cambio en la producción de agua después de una variación en la cubierta de coníferas. Zona de bajas precipitaciones.

La relación precipitación - cambio en producción de agua es muy interesante y podría ser de gran utilidad si se pudiera agregar una mayor cantidad de experiencias en cuencas hidrográficas en los rangos de precipitación en que son escasos tales como 1500 - 2000 y 2500 - 3000 en coníferas y menores a 600 mm en las latifoliadas, en tanto que los experimentos en matorrales están pobremente representados sobre los 900 milímetros. De acuerdo a Bosch y Hewelett (1982), los bosques generalmente no crecen en el rango menor a 600 mm por lo tanto no sorprende que muy pocos experimentos han sido llevados a cabo, pero en muchos países, grandes áreas de este rango están cubiertas con matorrales y vegetación esclerófila quienes compiten por el uso del agua y requieren, tal vez, una estimación más cuidadosa de los efectos del cambio en la cubierta vegetal.

Como un indicador de la evapotranspiración potencial, la estación es una variable importante que afecta la respuesta del flujo de cauce al cambio vegetacional. De acuerdo a Harr et al. (1979) e Ingnersen (1985), muchos de los incrementos en la producción anual en respuesta al madereo ocurren en la estación de lluvias. El suelo en las cuencas cortadas presenta un contenido de humedad relativamente alto a la llegada de la estación de lluvias para, posteriormente, recargar los niveles de humedad del suelo, dejando así más precipitación para el flujo de cauce.

De acuerdo a Harr (1979), citado por Keppeler y Ziemer (1990), durante el verano se han encontrado incrementos altos en el flujo de cauce, aunque en términos absolutos los grandes incrementos ocurren durante la estación de lluvias. Los incrementos del verano son de corta duración

alcanzando 2 a 3 años. En tanto, Anderson et al. (1976) y Wenger (1984), indican que los incrementos ocurren principalmente durante e inmediatamente después de la estación de crecimiento.

Otro factor que incide claramente en los niveles de producción de agua es la condición del sitio. Los incrementos en el flujo de cauce son pequeños y disminuyen más rápidamente en cuencas que presentan condiciones topográficas y de suelos favorables para el crecimiento de los árboles (Harr, 1983; Nakano, 1967 citado por Keppeler y Ziemer 1990).

Las recopilaciones de experiencias en cuencas hidrográficas podrían servir para anticipar los efectos del cambio vegetacional en otras cuencas. Debido a esto, desde que Hibbert (1967), citado por McMimm y Hewlett (1975), publicó una recopilación de 39 experimentos realizados en cuencas hidrográficas, algunos hidrólogos forestales han tratado de encontrar un modelo universal que pueda predecir el cambio máximo en el flujo de agua después de un cambio de la densidad boscosa.

Douglas y Swank (1972), citados por McMimm y Hewlett (1975), construyeron una regresión lineal que combinaba los resultados de 22 experimentos en cuencas hidrográficas.

La ecuación de regresión es:

$$Y = - 1.39 + 0.13x$$

Donde Y es el incremento máximo (pulgadas) producido durante el primer año después del tratamiento y X es el porcentaje de reducción del área basal en un rodal de latifoliadas.

Un modelo alternativo fue presentado por McMinn y Hewlett (1975), siendo su forma general la siguiente:

$$Y = b_0 + b_1 (1 - e^{(b_2 X)})$$

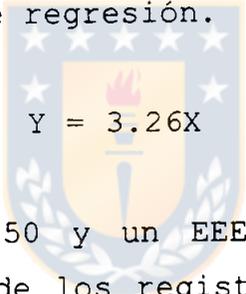
Donde: Y , es el incremento máximo producido el primer año después del tratamiento; X , es el porcentaje de reducción del área basal b_0 , b_1 y b_2 son parámetros estimados desde los datos experimentales. De acuerdo a las estimaciones realizadas, el modelo de McMinn y Hewlett (1975), concuerda con el modelo de Douglas y Swank (1972), cuando las reducciones en el área basal son grandes, en tanto que para reducciones pequeñas se presentan diferencias mayores, ya que el modelo de McMinn y Hewlett, es forzado a pasar por el origen, considerando que ningún experimento indicaba que la respuesta a las cortas fuera negativa. De acuerdo a sus autores la ventaja de este modelo se debe a que permite entregar una estimación sobre todo el rango de la variable independiente y resulta más flexible que otras curvas, pues requiere nuevos valores de los parámetros antes que nuevas formas algebraicas.

Trimble et al. (1987), con los registros de la recopilación de Bosch y Hewlett (1982), construyeron la siguiente ecuación de regresión:

$$Y = 3.40X$$

Donde Y es el incremento o reducción máxima del flujo de agua (mm), X es el porcentaje de cambio de la cobertura vegetal obteniendo para una muestra de $N = 55$, un $r^2 = 0,38$ y un Error Estándar de Estimación (EEE) igual a 105 milímetros. La ecuación es forzada a pasar por el origen considerando la premisa que "el efecto de cero tratamiento debe ser cero".

Trimble et al. (1987), reunieron los registros de la recopilación de Bosch y Hewlett, (1982), con las mediciones de producción de agua obtenidas desde cuencas que presentaban áreas entre 282000 ha a 1945000 ha, generando la siguiente ecuación de regresión.


$$Y = 3.26X$$

Obteniendo un r^2 de 0,50 y un EEE de 89 mm. Según los autores la utilización de los registros de cuencas de gran tamaño ayudan más que los datos de cuencas experimentales pareadas para la construcción de un modelo universal. Esto se debería a que las cuencas pequeñas a pesar de tener poca variabilidad interna tienen mucha entre cuencas (vegetación, orientación, clima y suelo), lo que lleva a tener resultados variables que impiden construir un buen modelo predictor, en tanto, las cuencas grandes están compuestas de diversos tipos de vegetación, orientación y suelo, lo que las hace más universales disminuyendo la variabilidad entre cuencas.

De acuerdo a lo visto en este estudio, los cambios en la producción de agua como respuesta a la modificación de la cobertura vegetal, son principalmente una función de

la evapotranspiración del bosque, individualmente la transpiración y la intercepción. Al considerar la importancia relativa de estos procesos en los cambios de producción de agua Pearce y Rowe (1979), indican que la producción de agua en áreas forestadas depende fuertemente de las características de la intercepción y de la frecuencia y duración de la humedad del dosel. En zonas de grandes precipitaciones, la intercepción puede contar con el 60 - 70% del total de las pérdidas por evaporación. En áreas con más de 1500 mm/año de lluvias, los cambios en la producción de agua después de una manipulación de la vegetación son probablemente dominadas por cambios en las pérdidas por intercepción.

3.6. Síntesis del efecto del cambio vegetacional en la producción de agua.

Las principales observaciones obtenidas del análisis de los diferentes tratamientos realizados en cuencas hidrográficas son los siguientes.

- La corta de árboles reduce la intercepción y la transpiración dejando más agua disponible para otros procesos hidrológicos tales como flujo de cauce, escorrentía superficial y recarga de acuíferos subterráneos.
- La construcción de caminos en más del 12% de la superficie de las cuencas, generalmente provoca un aumento de la producción del agua y de los flujos máximos.
- La regeneración de los bosques, en forma natural o por plantación revierte los efectos de la corta. La producción de agua es reducida, la tasa de esta

reducción depende sobre todo de la tasa de crecimiento de la nueva vegetación herbácea y leñosa.

- El cambio de especie de una cuenca de latifoliadas, arbustos y pastizales en una de coníferas, generalmente provoca una disminución en la producción de agua.
- La quema de bosques puede incrementar la producción de agua. La magnitud de este incremento depende de la intensidad de la quema y de la proporción de la cuenca que es quemada.
- En zonas de altas precipitaciones, los cambios en la producción de agua después de una manipulación de la vegetación son probablemente dominadas por cambios en las pérdidas por intercepción.
- Las cubiertas de coníferas, latifoliadas, matorrales y pastizales tienen en este orden, una influencia decreciente en la producción de agua en el área en que estas cubiertas son manipuladas.
- La cantidad de producción de agua es proporcional al porcentaje de cambio vegetacional y a la intensidad de las precipitaciones.

-

.

IV CONCLUSIONES

Sobre la base del análisis de los antecedentes obtenidos en este estudio, se concluye que:

- El cambio vegetacional en las cuencas hidrográficas provoca una variación en la producción de agua. Un aumento en la cubierta vegetal disminuye la producción de agua, en tanto que una disminución de la cubierta vegetal provoca el efecto contrario. Estas variaciones están muy relacionadas tanto a los montos de las precipitaciones medias del sector en el cual se realiza el cambio vegetacional como a la magnitud del cambio.
- El reemplazo de especies latifoliadas, arbustos, pastizales o cultivos agrícolas por coníferas provoca una disminución en la producción de agua.
- Las variaciones producidas en la cantidad de agua después de los tratamientos se deben a cambios en los niveles de intercepción y de transpiración.

V RESUMEN.

En este trabajo se realizó una recopilación de antecedentes bibliográficos sobre el ciclo hidrológico y los efectos de los tratamientos vegetacionales en la producción de agua.

En el ciclo hidrológico se recopilaron antecedentes sobre los diferentes componentes que lo conforman, especialmente los procesos de intercepción y transpiración. En tanto que el efecto del cambio vegetacional en la producción de agua se analizó mediante la obtención de antecedentes bibliográficos sobre diferentes tratamientos vegetacionales y especialmente con la confección de una tabla resumen con más de 150 experiencias realizadas en cuencas hidrográficas de todo el mundo donde se muestran las consecuencias en la cantidad de agua producto de distintas intensidades de intervención en la vegetación. De acuerdo a esto, se observó que los distintos tratamientos alteran los niveles de evapotranspiración provocando cambios en la producción de agua, cuya magnitud dependerá especialmente del porcentaje de cambio vegetacional y de la intensidad de las precipitaciones.

SUMMARY

In this work, a compilation of bibliographical backgrounds was done about the hydrological cycle and the effects of vegetational treatments on water production.

In the hydrological cycle, information was gathered on its different components, specially, the processes of interception and transpiration whereas the effect of the vegetational change was analysed through gathering bibliographic information of different vegetational treatments. This was mainly done with the construction of summary table containing over 150 experiences carried out in different watersheds all over the world, where they show the consequences in the amount of water is a result of different intensities of intervention in vegetation. According to this, it was seen that the different treatments alter the levels of evotranspiration provoking changes in water production whose magnitude will depend, specially, on the percentage of the vegetational change and the intensity of rainfalls.

VI BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, H. W., M. D. Hoover and K. C. Reinhart. 1970. Forests and water: effects of forest management on floods, sedimentation, and water supply. Report. PSW- 18 USDA Forest. Serv. California, USA.
2. Anderson, A. R., D. G. Pyatt and J. P. Strannard. 1991. The effects of clearfelling a Sitka spruce stand on the water balance of a peaty gley soil at Kershope Forest, Cumbria. For. Abst. 52: 160.
3. Ashton, D. H. 1975. The root and shoot development of *Eucalyptus regnans* F. Muell. Aust. J. Bot. 23:867-887.
4. Aston, A.R. 1979. Rainfall interception by eight small trees. J. Hydrol. 42:383-396.
5. Aussenac, G. 1968. Interception des précipitations par le couvert forestier. Ann. Sci. For. 25:135 - 156.
6. Aussenac, G. 1970. Action du couvert forestier sur le distribution au sol des precipitations. Ann. Sci. For. 27: 383-399.
7. Aussenac, G., G. Boulangeat. 1980. Interception des précipitations et evapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziessi* Mirb Franco). Ann. Sci. For. 37: 91-107.
8. Baker, M. B. 1986. Effects of ponderosa Pine treatments on water yield in Arizona. Water Resour. Res. 22: 67-73.

9. Bell, R. W., N. J. Schofield, I. C. Loh and M. A. Bari. 1990. Groundwater response to reforestation in the darling range of western Australia. *J. Hydrol.* 119:179-200.
10. Black, T. A. 1979. Evapotranspiration for Douglas fir stands exposes to soil water deficits. *Water Resour. Res.* 15:15: 164-171.
11. Black, T. A., C. S. Tam and J. U. Nnyamah. 1980. Transpiration rate of Douglas fir trees in thinned and unthinned stands. *Can J. Soil Sci.* 60:625-631.
12. Blackburn, W. H., J. C. Wood and M. G. Ochaven. 1986. Stormflow and sediment losses from site-prepared forestland in East Texas. *Water Resour. Res.* 22:776-784.
13. Borg, H., R. W. Bell and I. C. Loh. 1988. Streamflow and stream salinity in a small water supply catchment in southwest western Australia after reforestation. *J. Hydrol.* 103:323-333
14. Borg, H., G. L. Stoneman and C. G. Ward. 1988. The effect of logging and regeneration on ground. *J. Hydrol.* 99:253-270.
15. Borg, H. and G. L. Stoneman. 1991. Long - term implications for streamflow of changes in vegetation cover and stand height in generation karri stands in southwest western Australia. *For. Ecol. Manage.* 40:65-73.
16. Bosch, J. M and J. D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.* 55:3 - 23.

17. Bowes, M. D., J. V. Krutilla and P. B. Sherman. 1984. Forest management for increased timber and water yields. *Water Resour. Res.* 20:655-663.
18. Bultot, F. and G. L. Dupreis. 1976a. Conceptual hydrological model for an average-sized catchment area. I. Concepts and relationships. *J. Hydrol.* 29:251-272.
19. Bultot, F. and G. L. Dupreis. 1976b. Conceptual hydrological model for an average- sized catchment area. II Estimate of parameters, validity of model, application. *J. Hydrol.* 29: 273-292.
20. Bultot, F., G. L. Dupreis and D. Gellens. 1990. Simulation of land use changes and impacts on the water balance - a case study for Belgium. *J. Hydrol.* 114:348.
21. Calder, I.R. 1976. The measurement of water losses from a forested area using a "natural" lysimeter. *J. Hydrol.* 30: 311-325
22. Calder, I.R. 1977. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon Central Wales. *J. Hydrol.* 33: 247-265.
23. Calder, I. R. 1986. Water use of eucalypts - A review with special reference to south India. *Agric. Water Manage.* 11:333-342.
24. Carbon, B. A., G. A. Bartle, A. M. Murray and D. K. Macpherson. 1980. The distribution of root length, and the limits to flow of soil water to roots in a dry sclerophyll forest. *For. Sci.* 26: 656-664.
25. Cicco, V., F. C. Arcova, P. Y. Shimomichi and M. Fujieda. 1987. Rain interception by natural secondary forest of mata atlantica- Sao Paulo. *For. Abst.* 48:87.

26. Cooper T. A. and J. G. Lockwood. 1987. The influence of rainfall distribution in numerical simulation of evapotranspiration from a multilayer model pine canopy. *Water Resour. Res.* 23: 1645-1656.
27. Custodio, E. y M. R. Llamas. 1976. *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega. Barcelona, España.
28. Cheng, J. 1989. Streamflow changes after clear-cut logging of a pine beetle-infested watershed in southern British Columbia, Canada. *Water Resour. Res.* 25: 449-456.
29. Daniel, P., U. Helms. y F. Baker. 1982. *Principios de silvicultura*. Mc Graw-Hill. Mexico.
30. Devlin, R. 1980. *Fisiología Vegetal*. Ediciones Omega. Barcelona, España.
31. Dolman, A. J., J. B. Stewart and J. D. Cooper. 1988. Predicting forest transpiration from climatological data. *Agric. For. Meteorol.* 42:339-353.
32. Donoso, C. 1990. *Ecología Forestal. El bosque y su medioambiente*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
33. Dons, A. 1986. The effect of large-scale afforestation on Tarawera river flows. *J. Hydrol. (New Zealand)*. 25: 61-73.
34. Dons, A. 1987. Hydrology and sediment regime of a pasture, native forest, and pine forest catchment in the Central North Island New Zealand. *N. Z. J. For. Sci.* 17:161-178.
35. Evans, J. O. and J. H. Patric. 1983. Harvest trees, reap water. *J. Soil Water Conserv.* 38:390-392.

36. Feller, M.C. 1981. Water balances in *Eucalyptus regnans*, *Eucalyptus obliqua*, and *Pinus radiata* forest in Victoria. Aust. For. 44: 153-161.
37. Florence, R. G. 1986. Cultural problems of *Eucalyptus* exotics. Commonw. For. Rev. 65:141-163.
38. Forgeard, F., J. Gloagen and J. Touffec. 1980. Interception des precipitations et apport au sol délements minéraux par les eaux de pluie et les pluviollessivals dans une hetraie Atlantiqueet dans quelques peuplements resineux en Bretagne. Ann. Sci. For. 37: 53-70.
39. Francke, S. 1993. Efectos de las plantaciones forestales en el suelo. Documento técnico N°70. Chile Forestal N° 205.
40. Franken, W., P. R. Leopoldo, E. Matsui and M. Ribeiro. 1987. Study of interception of rainfall in terra firme type amazon forest cover. For. Abst. 48: 474.
41. Gash, J. H. and J. B. Stewart. 1977. The evaporation from Thetford Forest during 1975. J. Hydrol. 35: 385-396.
42. Gash, J.H., I.R. Wright and C.R. Lloyd. 1980. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. J. Hydrol. 48: 89-105.
43. Gayoso, J. and A. Iroume. 1991. Compaction and soil disturbances from logging in suthern Chile. Ann. Sci. For. 48. 63-71.
44. George, M. 1980. Interception, stemflow and throughfall in a eucalyptus hybrid plantation. For. Abst. 41:424.

45. Gholz, H. L., K. C. Ewel and R. Teskey. 1990. Water and forest productivity. *For. Ecol. Manage.* 30:317-329.
46. Ginter-Whitehouse, D. L., T. M. Hinckley and S. G. Pallardy. 1983. Spatial and temporal aspects of water relations of three species with different vascular anatomy. *For. Sci.* 29: 317-329.
47. González de Tanago, M., M. García, L. Ortega y M. Tourne. 1988. Intercepción y calidad del agua de lluvia bajo diferentes condiciones de cubierta vegetal. *Ecología.* 2: 99-110.
48. Greenwood, E. A., J. D. Beresford, J. R. Bartle and R. J. W. Borron. 1982. Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique. IV. evaporation from a regenerating forest of *Eucalyptus wandoo* on land formerly cleared for agriculture. *J. Hydrol.* 58:357-366.
49. Greenwood, E. A., L. Klein, J. D. Beresford and G. D. Watson. 1985. Differences in annual evaporation between grazed pasture and eucalyptus species in plantations on a saline farm catchment. *J. Hydrol.* 78:261-278.
50. Harr, R. D., W. C. Harper, F. T. Krygier and F. S. Hsieh. 1975. Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon coast range. *Water Resour. Res.* 11: 436-444.
51. Harr, R. D., A. Levnoo and R. Mersereau. 1982. Streamflow changes after logging 130-year-old Douglas fir in two small watersheds. *Water Resour. Res.* 20: 1669-1679.

52. Herwitz, S. R. 1985. Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees. *J. Hydrol.* 77: 237-252.
53. Hsia, Y. J., B. Y. Yang, H. B. King and S. Chi. 1984. Water yield resulting from clearcutting treatment on the Lie-Hua-Chi experimental watershed in central Taiwan. *For. Abst.* 45: 662.
54. Hsia, Y. J. 1987. Changes in storm hydrographs after clearfelling at small hardwood-forested watershed in central Taiwan. *For. Abst.* 45: 662.
55. Huber, A. y C. Oyarzun. 1983. Precipitación neta e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque.* 5: 13-20.
56. Huber, A., C. Oyarzun, M. Ramirez y H. Figueroa. 1983. Influencia de algunos factores meteorológicos en el consumo de agua por transpiración de *Nothofagus obliqua* (Mirb) Oert, y *Nothofagus dombeyi* (Mirb) Oert. *Turrialba.* 33: 169-176.
57. Huber, A. y C. Oyarzun. 1984. Factores reguladores de la intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque* 5: 59-64.
58. Huber, A., C. Oyarzún y A. Ellies. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* D. Don y una pradera. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. *Bosque.* 6: 74-82.
59. Huber, A., C. Oyarzun y M. Oñate. 1986. Factores reguladores de la transpiración potencial de algunas especies arbóreas del bosque siempre verde del sur de Chile. *Turrialba.* 36: 329- 336.
60. Huber, A. 1991. Consecuencias en el balance hídrico por reemplazo de cubiertas vegetales naturales por

- plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en: I Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Concepción, Chile, 22 al 26 Oct. 1990. Informe final y memorias. FAO. Santiago, Chile.
61. Iacobelli, A. and J. McCaughey. 1993. Stomatal conductance in northern temperate deciduous forest: temporal and spatial patterns. *Can. J. For. Res.* 23: 245-252.
 62. Influencia del Hombre en el Ciclo Hidrológico. 1974. Estudio sobre riego y avenamiento N°17. FAO. Roma, Italia.
 63. Jackson, R. J. 1975. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. Hydrol.* 24: 215-238.
 64. Johnson, R. C. 1990. The interception, throughfall and stemflow in a forest in Highland Scotland and the comparison with others upland forest in the U.K. *J. Hydrol.* 118: 281-287.
 65. Jordan, C. F. and J. Heuvelop. 1984. The water budget of an amazonian rain forest. *For. Abst.* 45: 419.
 66. Jung, M. A. 1989. Relación precipitación-escorrentía. En: H. Peña y M. A. Jungk. *Hidrología superficial. Curso de perfeccionamiento 24 Abril- 6 Mayo Vol. 1.* Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
 67. Keppeeler, E. and R. Ziemer. 1990. Logging effects on streamflow, water yield and summer low flows at Caspar Creek in northwestern California. *Water Resour. Res.* 26: 166-1679.
 68. Kim, K. H. and M. B. Woo. 1990. Study on rainfall interception loss from canopy in forest. *For. Abst.* 51: 957.

69. King, J. C. and L. C. Tennyson. 1984. Alteration of streamflow characteristics following road construction in north central Idaho. *Water Resour. Res.* 29: 1159-1163.
70. Kittredge, J. 1948. *Forest influences*. Mc Graw-Hill. Book. New York, USA.
71. Langford, K. J. 1976. Change in yield of water following a bushfire in a forest of *Eucalyptus regnans*. *J. Hydrol.* 29: 87-114.
72. Landsberg, J. J. and R. McMurtrie. 1984. Water use by isolated trees. *Agric. Water Manage.* 8:223-242.
73. Lassen, J. 1964. Algunas relaciones entre planta suelo y agua en el manejo de cuencas. Servicio Forestal. México.
74. Lavabre, J., D. Sempere Torres and F. Carnesson. 1993. Changes in the hydrological response of a small mediterranean basin a year after a wildfire. *J. Hydrol.* 142: 273-299.
75. *Lecturas Especiales Sobre Técnicas de Conservación*. 1974. Conservación de suelos N°4. FAO. Roma, Italia.
76. Leitch, C.J and D. W. Flinn. 1987. Hydrological effects of clearing native forest in north-east Victoria: the first 3 years. *For. Abst.* 48: 419.
77. Leopoldo, P. R., W. Franker, E. Matsui and E. Salati. 1987. Estimation of evapotranspiration in amazon terra firme forest. *For. Abst.* 48: 474.
78. Leuning, R., P. E. Kriedmann and R. E. McMurtrie. 1991. Simulation of evapotranspiration by trees. *Agric. Water Manage.* 19: 205-221.

79. Linsley, R., H. Kohler y J. Paulus. 1977. Hidrología para Ingenieros. Mc Graw-Hill Latinoamericana. México.
80. Lockwood, J. G. 1990. The influence of temperature variations on interception loss and water storage in vegetation canopies. Water Resour. Res. 20: 941-943.
81. Lopez Cadenas de Llano, F. 1990. El papel del bosque en la conservación del agua y del suelo. Ecología. (1): 141-155.
82. Loustau, D., P. Berbigier, A. Granier and F. El Hadj. 1992. Interception loss throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. J. Hydrol. 138: 449-467.
83. Loustau, D., P. Berbigier and A. Granier. 1992. Interception loss throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of Gash's analytical model of interception. J. Hydrol. 138: 469-485.
84. Lull, H. 1964. Ecological and silvicultural aspects. In: Chow Ven Te (Ed.) Handbook of Applied Hydrology. Mc Graw-Hill. New York, USA.
85. Mahendrappa, M. K. 1990. Partitioning of rainwater and chemicals into throughfall and stemflow in different forest stands. For. Ecol. Manage. 30: 65-72.
86. Malmer, A. 1992. Water-yield changes after clear-felling tropical rainforest and establishment of forest plantation in Sabah, Malaysia. J. Hydrol. 134:77-94.
87. McMinn, W. and J. D. Hewlett. 1975. First-year water yield increase after forest cutting: alternative model. J. For. 73: 654-655.

88. Miller, E., R. Basly and E. P. Lawson. 1988. Forest harvest and site preparation effects on stormflow and peakflow of ephemeral streams in Ouchita Mountain. *J. Environ. Qual.* 17: 212-218.
89. Morton, F. I. 1984. What are the limits on forest evaporation. *J. Hydrol.* 74: 373-398.
90. Návar, J. and R. Bryan. 1990. Interception loss and rainfall redistribution by three semi - arid growing shrubs in northeastern México. *J. Hydrol.* 115: 51-63.
91. Neal, C., A. J. Robson, R. L. Hall, G. Ryland, T. Conway and M. Neal. 1991. Hydrological impacts of hardwood plantation in Lowland Britain: Preliminary finding on interception at a forest edge, Black wood, Hampshire, southern England. *J. Hydrol.* 127:349-365.
92. Oyarzún, C. E., A. N. Huber y S. G. Vásquez. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* F: Redistribución de las precipitaciones. *Bosque.* 6: 3-4.
93. Patric, J. H. 1980. Effect of wood products harvest on forest soil and water relations. *J. Environ. Qual.* 9: 73-80.
94. Pearce, A. and L. Rowe. 1979. Forest management effects on interception, evap. and water yield. *J. Hydrol. (New Zealand).* 18: 73-87.
95. Pearce, A.J., L.K. Rowe and J. B. Stewart. 1980. Nighttime, wet canopy evaporation rates and the water balance of canopy on evergreen mixed forest. *Water Resour. Res.* 16: 955-959.
96. Pearce, A. J., J. H. Gash and J. B. Stewart. 1980. Rainfall interception in a multi-storied evergreen

- mixed forest: estimates using Gash's analytical model. J. Hydrol. 94: 47-65.
97. Pearce, A. and L. Rowe. 1981. Rainfall interception in a multi-storied evergreen mixed forest: Estimates using Gash's analytical model. J. Hydrol. 49: 341-353.
98. Peck, A. J. and D. R. Williamson. 1987. Effects of forest clearing on groundwater. J. Hydrol. 94: 47-65.
99. Pereira. J. S. and T. T. Koslowski. 1976. Leaf anatomy and water relations of *Eucalyptus camaldulensis* and *E. globulus* seedling Canad. J, Bot. 54: 2868-80.
100. Pilgrim, D. H., D. G. Doran, J. A. Rowbottom, S. M. Mackay and J. Tjendana. 1984. Water balance and runoff characteristics of mature and cleared pine and eucalypt catchment at Lidsdale, New South Wales. For. Abst. 45:473.
101. Pitman, W. V. 1978. Trends in streamflow due to upstream land-use changes. J. Hydrol. 39 :227-237.
102. Poore, D. and C. Fries. 1987. Efectos ecológicos de los eucaliptos. Serie FAO Montes N°59. FAO. Roma.
103. Potts, D. F. 1985. Hydrologic impacts of a large-scale mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins) epidemic. For. Abst. 46: 254.
104. Prevost, M. and AP. Plamondon. 1988. Rainfall interception by debris and vegetation established after clearfelling. For. Abst. 49:686.
105. Pritchett, W. L. and R. F. Fisher. 1987. Properties and management of forest soils. (2a Ed.) J. Wiley. New York, USA.

106. Raev, I. 1986. Some regularities in the interception of forest stand in south east Europe. In: 18th IUFRO World Congress Vol. II. Forest Environment and Silviculture. Ljubljana, Yugoslavia.
107. Raich, J. W. 1985. Throughfall and stemflow in mature and year-old wet tropical forest. For. Abst. 46: 622.
108. Rich, L. R. 1972. Managing a ponderosa pine forest to increase water yield. Water Resour. Res. 8: 442-428.
109. Rich, L.R. and G. J. Gottfried. 1976. Water yields resulting from treatments on the Workman Creak experimental watersheds in central Arizona. Water Resour. Res. 12: 1053-1060.
110. Riekert, H. 1987. Influence of silvicultural practices on the hydrology of Pine flatwoods in Florida. Water Resour. Res. 25: 713-719.
111. Roberts, J. 1983. Forest transpiration: a conservative hydrological process J. Hydrol. 66:33-141.
112. Rosales, L. J. 1993. Efectos ecológicos del género *Eucalyptus*: Una revisión de literatura con énfasis en la especie *Eucalyptus globulus* Labill. Tesis de grado. Universidad de Concepción, Fac. Cienc. Forestales, Chillan, Chile.
113. Rosen, K. 1984. Effect of clear-felling on run-off in two small watersheds in central Sweden. For. Ecol. Manage. 9: 267-281.
114. Rowe, P. B. 1979. Rainfall interception by a beech-podocarp hardwood forest near Reefton, north-westland, New Zealand. J. Hydrol. (New Zealand). 18:63-71.

115. Rowe, P.B. 1983. Rainfall interception by an evergreen beech forest. Nelson, (New Zealand). J. Hydrol. 66:143-158.
116. Ruprecht, J. K. and N.J.Schofield.1989. Analysis of streamflow generation following deforestation in south-west western Australia. J. Hydrol. 105: 1-18.
117. Ruprecht, J. K., N. J. Schofield, D. S. Crombie and G. L. Stoneman. 1991. Early hydrological response to intense forest thinning in sothwestern Australia. J. Hydrol. 127:261-277.
118. Ruprecht, J. K. and N. J. Schofield. 1991a. Effects of partial deforestation on hydrology and salinity in hight salt storage landscapes I. Extensive block clearing. J. Hydrol. 129:19-38.
119. Ruprecht, J. K. and N. J. Schofield. 1991a. Effects of partial deforestation on hydrology and salinity in hight salt storage landscapes II. Strip, soils and parkland clearing. J. Hydrol. 129.39-55.
120. Salgado, L. 1989. Apuntes de Hidrología. Universidad de Concepción.Fac. de Cienc. Agron. Vet. For. Chillán.
121. Samraj, P., V. N. Sharda, S. Chinnamani, V. Lakshmanan, and B. Haldoral. 1988. Hydrological behaviour of the Nilgiri sub-watersheds as affected by bluegum plantations. Part 1. The annual water balance. J. Hydrol. 103:335-345.
122. Sands, R. and D. R. Mulligan. 1990. Water and nutrient dynamics and tree growth. For. Ecol. Manage. 30:91-111.
123. Scatena, F. N. 1990. Watershed scale rainfall interception on two forested watershed in the Luguillo Mountains of Puerto Rico. J. Hydrol. 113: 89-102.

124. Schulze, R. E, C. R. Scott-Shaw and U. W. Nanni. 1978. Interception by *Pinus Patula* in relation to rainfall parameters. J. Hydrol. 36: 393-396.
125. Sharda, V. N., P. Samraj, S. Chinnamani and V. Lakshmanan. 1988. Hydrological behaviour of the Nilgiri sub-watersheds as affected by bluegum plantations. Part II. Monthly water balances at different rainfall and runoff probabilities. J. Hydrol. 103: 347-355.
126. Sharma, M. L., R. J. W. Baron and D. R. Williamson. 1987. Soil water dynamics of lateritic catchments as affected by forest clearing for pasture. J. Hydrol. 94: 29-46.
127. Singh, B. and G. Szeicz. 1979. The effect of intercepted rainfall on the water balance of a hardwood forest, Water Resour. Res. 15: 131-138.
128. Singh, B. and G. Szeicz. 1980. Predicting the canopy resistance of a mixed hardwood forest. Agric. Meteorol. 21:49-58.
129. Singh, R. P., K. C. Sharma, H. N. Mathur, M. K. Gupta and A. K. Gupta. 1984. Interception studies in *Cedrus deodara* loudon plantation in Himachal Pradesh, India. For. Abst. 45:55.
130. Singh, R. P. 1988. Rainfall interception by *Pinus wallichiana* plantation in temperate region of Himachal Pradesh, India. For. Abst. 49: 542.
131. Spurr, S. and B. V. Barnes. 1990. Ecología Forestal. AGT. Editor. México.
132. Stewart, J.B. 1977. Evaporation from the wet canopy of a pine forest. Water Resour. Res. 13:1915-921.

133. Stoneman, G. L. and N. J. Schofield. 1989. Silviculture for water production in jarrah forest of western Australia: an evaluation. For. Ecol. Manage. 27: 273-293.
134. Swank, W. T., J. E. Douglas and G. B. Cunningham. 1986. Changes in water yield and storm hydrographs following commercial clearcutting on a southern appalachian catchment. For. Abst. 1986 47: 539.
135. Swanson, R. D. Golding, R. Rothwell and P. Bernier. 1990. Hydrologic effects of clear-cutting at Marmont Creek and streeter watersheds, Albert. For. Abst . 51:56.
136. Swindel, B. F. C. J. Lassiter and H. Riekerk. 1982. Effects of clearcutting and site preparation on water yields from slash pine forest. For. Ecol. Manage. 4: 110-113.
137. Teklehaimanot, Z., P. G. Jarvis and D. Ledoer. 1991. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. J. Hydrol. 123:261-278.
138. Trimble, S. W., F. H. Weirich and B. L. Hoag. 1987. Reforestation and the reduction of water yield on the southern Piedmont Since Circa 1940. Water Resour. Res. 23:425-437.
139. Trimble, S. W. and F. H. Weirich. 1987. Reforestation reduces southeastern United States. J. Soil and Water Conser.42: 274-276.
140. Troendle, C. A. and R. M. King. 1985. The effect of timber harvest on the Fool Creek watershed, 30 years later. Water Resour. Res. 21:1915-1922.

141. Tsykin, E., E. M. Laurenson and A. V. Wu. 1984. Hydrologic effects of replacement of eucalyptus forest by pasture and pines. For. Abst. 45:473.
142. Van Lill, W. S., F. J. Kruger and D. B. Van Wyk. 1980. The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill es Maiden and *Pinus patula* Schlect, et cham on streamflow from experimental catchment at Mokobulaan, Transvaal. J. Hydrol. 48: 107-118.
143. Vasquez, S. 1983. Características del ciclo hidrológico en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. con distinto manejo. Tesis de grado. Universidad Austral. Fac. Cienc. Forestales. Valdivia, Chile.
144. Viville, D., P. Biron, P. Granier, E. Dambrine and A. Probst. 1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the strengbasch catchment (Vosges, France). J. Hydrol. 144: 273-282.
145. Wenger, E. 1984. Forest hydrology and watershed management pp. 637-677. En Forestry Handbook. (2da Ed.) J. Wiley y Sons, New York, USA.
146. Williamson, D. R., R. A. Stokes and J. K. Ruprecht. 1987. Response of input and output of water and chloride to clearing for agriculture. J. Hydrol. 94:1-28.
147. Zahner, R. and F. W. Whitmore. 1960. Early growth of radically thinned loblolly pine. J. For. 58:628-634.
148. Ziemer, R. R. 1981. Stormflow response to road building and partial cutting in small streams of northern californice. Water Resour. Res. 17:907-917.