



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

Variación en la generación de caudales y de sedimentos en suspensión, con énfasis en eventos de tormenta para una microcuenca de la Provincia de Valdivia, Décima Región

Patrocinante: Sr. Anton Huber J.

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

RENATO ALEJANDRO RIVERA MENESES

VALDIVIA
2005

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Anton Huber Jaeger	5.0
Informante:	Sr. Andres Iroumé Arrau	4.8
Informante:	Sr. Rubén Peñaloza Wagenknecht	6.2

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

Sr. Antón Huber j.

**A mi familia y amigos
Presentes y ausentes...
Gracias por su amor eterno**

Resumen ejecutivo

Para el periodo de agosto de 2004 y junio de 2005, se cuantificó la cantidad de agua que exportó una cuenca de 17.8 has, ubicada en la costa de la provincia de Valdivia, cubierta con una plantación de *Pinus radiata* de 28 años de edad. Esta cuenca a mediados de mayo fue talada en un 50% de su superficie.

La precipitación cuantificada fue 2535.1 mm y se exportó la cantidad de agua equivalente a 1401 mm. Se observó una fuerte variación en la distribución de las precipitaciones, caracterizado por un invierno lluvioso y un verano seco. La cuenca presentó una buena capacidad de almacenar agua, manifestando un caudal promedio de 9.06 l/s, con valores mínimos de 2.1 l/s ocurrido en abril y un máximo de 26.7 l/s en el mes de junio.

Se determinó que los procesos de generación de escorrentía son regulados indirectamente por el contenido de humedad del suelo. Para el periodo de primavera-verano, el tipo de escorrentía más importante es el sub superficial representado por el caudal base. Durante el invierno el caudal correspondió principalmente a escorrentía superficial.

La exportación de sedimentos siguió una similar variación estacional, que la del caudal. En verano ocurrieron los valores mínimos, en comparación con los de invierno. La cantidad de sedimento promedio exportado fue de 17.6 kg/ha/mes, con valores mínimo de 3.5 y máximo de 95 kg/ha/mes, esto antes de la tala rasa. Posterior a esta se exportó 4975.3 kg/ha/mes. La CSS durante los eventos de tormenta ocurridos en la condición de pre cosecha, fue en promedio 13.58 mg/l, valor similar al promedio calculado a escala mensual en condición pre cosecha. Los valores extremos variaron entre 3.8 y 49.8 mg/l. Para el evento de tormenta post cosecha, la CSS promedio fue de 3034.8 mg/l y sus valores extremos fueron 461.23 y 8253.8 mg/l.

La relación CSS / caudal, para los eventos de tormenta pre cosecha fue baja (r^2 de 20%) sin embargo esta relación fue mayor al analizar el tramo ascendente del hidrograma, con valores 84.9 %. El evento post cosecha mostró buenos valores de relación, tanto para el total, la fase ascendente y descendente, con valores de 77, 86 y 78% respectivamente. Esto demostró que los procesos erosivos están dominados por la cantidad de escorrentía superficial que se genere en la cuenca. Estos procesos se acentúan con la ausencia de vegetación.

Palabras claves: escorrentía, sedimentos en suspensión, análisis de tormentas, tala rasa.

INDICE DE MATERIAS

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Cuencas hidrográficas	3
2.1.1	Criterios para delimitar una cuenca	3
2.1.2	Balance hídrico en una cuenca	3
2.2	Procesos y mecanismos erosivos	4
2.3	Escorrentía y producción de sedimentos en eventos de lluvia	5
2.3.1	Fases en la generación de escorrentía	6
2.3.2	Factores que regulan la escorrentía	6
2.3.3	Comportamiento, características del sedimento y su relación con el caudal	7
2.4	Efecto de la actividad forestal en la producción de agua y sedimentos	9
3	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	10
3.1	Material	10
3.1.1	Ubicación cuenca de estudio, clima y características del suelo	10
3.1.2	Caracterización geomorfológica de la cuenca	11
3.1.3	Registro de la precipitación	11
3.1.4	Medición de caudales	11
3.1.5	Muestreo de agua	12
3.1.6	Cuantificación de sedimento en suspensión	12
3.1.7	Periodo de estudio	12
3.2	Metodología	12
3.2.1	Caracterización geomorfológica de la cuenca	12
3.2.2	Caracterización de la vegetación y suelo de la cuenca	12
3.2.3	Procesamientos de los valores de precipitación	13
3.2.4	Registro del caudal	13
3.2.5	Determinación de caudales	13
3.2.6	Captura de muestras de agua	13
3.2.7	Obtención de los sedimentos para los periodos mensuales	13
3.2.8	Obtención de sedimentos a escala horaria	13
3.2.9	Análisis del comportamiento del caudal en periodos mensuales	14
3.2.10	Análisis del comportamiento del caudal en eventos de tormenta	14

3.2.11	Relación concentración de sedimentos en suspensión (CSS) / caudal medio	15
4.	PRESENTACIÓN Y DISCUSION DE RESULTADOS	16
4.1	Geomorfología de la cuenca	16
4.2	Precipitación y escorrentía generados a escala mensual	18
4.3	Precipitación y caudales generados a escala diaria	20
4.4	Análisis de eventos de tormenta	22
4.5	Producción de sedimento en suspensión a escala mensual	25
4.6	Producción de sedimento en los eventos de tormenta	28
5.	CONCLUSIONES	33
6.	BIBLIOGRAFIA	34
ANEXOS		
1	Abstract and keywords	
2	Plano y Fotografía aérea cuenca experimental	
3	Fórmulas de parámetros y representaciones geomorfológicos	
4	Fotografías del efecto en la calidad de agua ante y después de la tala rasa	
5	Memoria de calculo de los sedimentos en suspensión para los eventos	

1. INTRODUCCIÓN

El control de la erosión superficial, la conservación y regulación de un recurso hídrico de buena calidad son preocupaciones y desafíos actuales en un país en desarrollo.

Por la importancia que alcanza el sector forestal en la economía de algunas regiones del país y particularmente en la Décima, resulta necesario generar estudios que permitan conocer, entender y monitorear los procesos hidrológicos que ocurren en cuencas cubiertas tanto por bosques naturales o por plantaciones forestales, con el propósito de alcanzar una producción sustentable tanto a nivel de microcuencas, como en cuencas mayores.

El desarrollo de las plantaciones, pasa por diferentes etapas, donde se aplican distintos tratamientos silviculturales, como la preparación de sitio (subsolados, fertilizaciones), raleos hasta llegar a la cosecha. Estas actividades generan cambios, que en distinto grado afectan el balance hídrico de la cuenca y por consecuencia los procesos erosivos que ocurren en ella.

Estos materiales en suspensión están estrechamente relacionados con los caudales y escurrimientos superficiales, que arrastran material por las laderas de las cuencas generados durante los periodos de tormenta (Iroumé, 2003).

Los sedimentos generalmente producen una baja en la calidad de agua, porque puede traer consigo, productos químicos de acciones como fertilización y control de malezas, en donde una parte de ellos son lixiviados y llevados a la red de drenaje. Lo anterior tiene como consecuencia alteraciones ecológicas que afectan a la fauna y flora, del entorno.

Entre la etapa de cosecha y el establecimiento de una nueva cubierta vegetal, que puede ser breve, de uno a tres años, se produce el mayor porcentaje de pérdidas de suelo y producción de sedimentos en los cauces, que pueden ocurrir durante una rotación (Iroumé *et al.*, 1989; Bruijnzeel, 1997).

Los sedimentos producen una baja en la calidad de sitio potencial, esto se acentúa cuando se utilizan sistemas de cosecha inapropiados para las condiciones de terreno, o no se hace una adecuada planificación en la red caminera (Fahey, 1994).

Los análisis a distinta escala temporal referido a la generación de caudales y producción de sedimentos son necesarios para entender los procesos que ocurren de esta manera se puede conocer la magnitud del impacto de alguna de las actividades forestales. Por otra parte genera información que permite eventualmente modelar estos procesos y así tomar medidas de mitigación.

Este trabajo de titulación tiene como propósito general:

Describir la variación en la producción de agua y de sedimentos en suspensión, a distintas escalas temporales para una microcuenca fluvial, cubierta por plantaciones adultas de *Pinus radiata*, para el periodo que va del invierno de 2004 hasta fines de otoño de 2005.

Objetivos específicos son:

Describir variaciones en el caudal generado a escala, mensual y diaria.

Analizar mediante hidrogramas la respuesta del caudal a eventos de tormenta de distinta intensidad y en distinta épocas del año, en conjunto con la producción de sedimentos.

Relacionar la concentración de sedimentos en suspensión, con caudales totales mensuales y caudales instantáneos medidos en eventos de tormenta.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Cuencas hidrográficas

Se define como cuenca a hidrográficas una superficie terrestre, en la cual el agua procedente de las precipitaciones caídas sobre ella se dirige hacia el mismo punto de salida. Si este punto se encuentra en el interior de los límites de ella se habla de cuenca endorreica, mientras que si el punto se encuentra sobre el mismo límite se habla de cuencas exorreicas. (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

MIDEPLAN (1998) define una cuenca como el territorio delimitado por las zona de escurriendo de las aguas superficiales, que convergen hacia un mismo cauce. Del mismo modo, una cuenca, sus recursos y sus habitantes, poseen determinadas condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales, que les confieren características comunes.

2.1.1 Criterios para delimitar una cuenca

Se delimitan mediante dos criterios (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

Límites hidrográficos: es la línea teórica que separa las aguas que llegan superficialmente a la sección de cierre de la cuenca establecida, de las que van a otras cuencas, esta división tiene además en cuenta el recorrido del agua infiltrada en el terreno.

Límites Topográficos: su trazado se obtiene a partir de un plano altimétrico, cuyas características son que las líneas divisorias cortan ortogonalmente a las curvas de nivel, si se corta el terreno por el plano normal de divisoria, el punto de intersección con esta, es el punto de mayor altitud del terreno.

2.1.2 Balance hídrico en una cuenca

Para una cuenca forestal el balance se obtiene integrando cada balance puntual de todas las zonas de la cuenca vertiente, este balance se simplifica cuando se analiza por un periodo superior a un año hidrológico y grandes superficies, porque se considera que la variación en el contenido de agua en el suelo, tiende a cero por lo que la ecuación queda:

$$P = Q + EVT + \Delta S / \Delta T \quad (1)$$

Donde:

P: Precipitación

Q: Caudal

EVT: Evapotranspiración

$\Delta S / \Delta T$: Variación del contenido de humedad

Esta ecuación se utiliza para la estimación de los valores anuales, el componente de más difícil medición es la evapotranspiración, que corresponde a la fracción de precipitación evaporada directamente del suelo o una masa libre de agua, más la transpirada por la cobertura vegetal, se determina con los valores de precipitación y escorrentía conocidos. Cuando se analizan periodo menores a un año, se debe agregar la variable $\Delta S/\Delta T$, que corresponde a la variación del contenido de humedad

Con todos los valores expresados en mm (l/m^2) de agua por unidad de tiempo; día, semana, mes ó año (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

2.2 Procesos y mecanismos erosivos

La erosión, que se refleja por la producción de sedimentos en una cuenca, es un proceso de tres fases, la primera consiste en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo, la segunda es el transporte por los agentes erosivos, corrientes de agua o viento y la tercera la depositación (Morgan; 1997). Se distinguen tres agentes que afectan el desprendimiento de partículas de suelo. El viento, la escorrentía superficial y la salpicadura de gotas de lluvia. Este último es el agente más importante que influye en el desprendimiento de partículas, principalmente por la acción del golpeteo de gotas de agua en el suelo desnudo.

La magnitud de la erosión esta regulada por los siguientes factores: La erosividad de agentes erosivos (energía cinética), la erodabilidad del suelo, la pendiente del terreno y la naturaleza de la cobertura vegetal (Morgan, 1997).

En particular, la precipitación en forma de lluvia, es el agente directamente relacionado con la pérdida de suelo, por la capacidad de las gotas de desprender partículas de suelos y la posterior formación de flujo superficial, que se manifiesta por el aumento de la escorrentía.

En general se describen dos tipos de lluvias: la tormenta intensa, de corta duración, que supera la capacidad de infiltración del terreno ello sella la capa superficial del suelo producto de la ruptura y reordenación de las partículas de los agregados, que rellenan los poros más gruesos. Y la de baja intensidad, que reduce paulatinamente la capacidad de infiltración del suelo (Poessen, 1992; Morgan, 1997).

Se considera que la lluvia tiene 256 veces más energía cinética que la escorrentía (Hudson 1982; Morgan, 1997). El mismo autor, explica que su valor umbral crítico de intensidad erosiva de 25 mm/h, esta relacionado con la energía cinética, la cual por debajo de este valor es baja y las gotas no tienen la misma capacidad para erosionar, por esta razón se considera a las lluvias de zonas tropicales 90% más erosivas, en comparación con las zonas templadas (Colotti, 2001).

Para medir la erosividad se han desarrollado distinto índices, dentro de los más usados esta el índice de Wischmeier ($EI/30$), que relaciona la precipitación máxima en 30 minutos (mm), la intensidad máxima en 30 minutos (mm/h) y la energía cinética

total producida por el evento. El índice de Hudson ($KE > 25$), que utiliza la energía cinética acumulada cuando la intensidad de la tormenta es igual o mayor a 25 mm/h. Para este autor, la erosión se produce con precipitaciones de intensidades mayor a este valor, sin embargo en latitudes templadas procesos erosivos, se correlacionan mejor con el índice de $KE > 10$ (Morgan, 1997). A similares conclusiones llego Conesa (2000).

El índice $E/30$ es cuestionado por asumir que se producen erosión con bajas intensidades de precipitaciones. Por otro lado, para suelos con cobertura vegetal clara o densa se encontró mejores correlaciones con intensidades de lluvia de 15 minutos. Esto para el caso de contrarrestar la probabilidad de sobreestimar la erosión por lluvias de alta intensidad. Se recomienda utilizar un valor máximo de $28.3 \text{ Jm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$, para todas las lluvias superiores a 76.2 mm/h y un valor máximo de 63.5 mm/h para el término de $I/30$.

Lorente *et al.* (2000) en una cuenca experimental en la provincia de Huesca España, Pirineo Central, cubierta por matorrales con tendencia a bosque abierto de *Pinus silvestris* y *Quercus gr. Faginea*, encontraron que las variables independientes: pick de la tormenta, precipitación total, precipitación máxima en 30 minutos, con la relación de la carga total de sedimento en suspensión alcanzan un r^2 de 87%, 93% y 95% respectivamente.

Morgan (1997) define el otro factor que regula la magnitud de la erosión, este es, la erosividad del suelo, definida como la resistencia del suelo al desprendimiento y transporte por agentes erosivos.

La respuesta del suelo a una lluvia dada está en función de su contenido de humedad, en consecuencia, depende de su estructura y de la intensidad de la lluvia. Según le Bissonnais (1990) y Morgan (1997) se describen tres posibles respuestas:

Si el suelo esta seco y la intensidad de la lluvia es alta, los agregados se rompen rápidamente al hidratarse y la capacidad de infiltración se reduce rápidamente.

Si los agregados están parcialmente húmedos y la intensidad es baja, se producen microrupturas y se transforman en agregados de menor tamaño, por lo que la rugosidad superficial disminuye, pero la velocidad de infiltración sigue siendo alta.

Si los agregados están inicialmente saturados, la capacidad de infiltración depende de la conductividad hidráulica del suelo saturado. Se necesitan grandes lluvias para sellar la superficie, sin embargo en suelos con un contenido de arcilla menor a 15% son susceptibles al sellado si la intensidad de la lluvia es alta.

2.3 Escorrentía y producción de sedimentos en eventos de lluvia

Se define escorrentía como la fracción de la precipitación que alcanza la red de drenaje, dividiéndose en:

Escurrientía subterránea: fracción de la precipitación que se desplaza llegando a la capa freática, desembocando posteriormente a la red de drenaje superficial. La velocidad de movimiento de esta agua es baja, menor a 1 m/h. (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

Escurrientía sub superficial: es producto de la saturación de los primeros horizontes del suelo y tiene un movimiento vertical y horizontal, pudiendo aparecer en la escurrientía superficial y viceversa (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

Escurrientía superficial: es el agua que no se infiltra, producto de la saturación del suelo y que alcanza la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno por acción de la gravedad (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

2.3.1 Fases en la generación de escurrientía

Un evento de lluvia provoca una serie de procesos dinámicos que se reflejan en el aumento de escurrientía, en el cual se reconocen las siguientes etapas (Martínez de Azagra y Navarro, 1996):

Fase 1. Antes que ocurra un evento de lluvia la cuenca pierde agua por procesos de evapotranspiración y escurrientía subterránea, que se manifiesta como flujo base. Esto provoca un descenso continuo en el contenido de humedad del suelo.

Fase 2. Al comenzar el evento la evapotranspiración se reduce, debido al aumento de la humedad relativa. El agua precipitada es interceptada por la vegetación. También se inicia el proceso de infiltración, por lo tanto aumenta la humedad del suelo. Se pueden producir encharcamiento de agua, según la micro topografía de la cuenca, generando escurrimiento superficial por las laderas.

La capacidad de infiltración del suelo, medida como la velocidad de infiltración es la que ejerce el control más importante sobre la generación de escurrientía superficial (Morgan, 1997).

Fase 3. La intensidad de la precipitación supera la capacidad de intercepción de la vegetación y la infiltración del agua en el suelo, por lo que el suelo se satura y se produce los mayores niveles de escurrientía en todos sus tipos.

Fase 4. Disminuyen las precipitaciones y la escurrientía superficial disminuye rápida y constantemente, el suelo aún está saturado y seguirá alimentando los cursos de agua a través de escurrimientos subsuperficiales y subterráneos.

2.3.2 Factores que regulan la escurrientía

El suelo: la escurrientía es menor en suelos de texturas más gruesas (arenosas), dado el mayor potencial de infiltración debido al mayor porcentaje de poros gruesos que poseen; también es menor en suelos con estructuras granular y de grano simple (Honorato, 1993).

La vegetación: es bien conocido el rol de la cubierta vegetal en la generación de escorrentía, ya que la cantidad de precipitación que llega al suelo depende en gran medida del tipo y densidad de esta cubierta (Iroumé y Huber, 2000). Por una parte la cubierta vegetal reduce la cantidad y disminuye la energía cinética de las precipitaciones, mediante el proceso de intercepción. Estudios realizados para una cuenca en zonas montañosas, demuestran que bajo distintos tipos de bosques (plantaciones de Pino oregón, y bosque nativo) reducen entre un 40% y 34% la precipitación respectivamente, siendo la diferencia la precipitación neta. (Iroumé y Huber 2000).

Por otra parte la vegetación frena la velocidad del flujo laminar, aumentando la posibilidad de infiltración. Mantiene el suelo por debajo de la capacidad de campo y por la incorporación de materia orgánica, mejora la estructura estabilizando los agregados frente a la acción del agua (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

La fauna: está ligada a la presencia de vegetación, la fauna edáfica oxigena y mejora la estructura al mezclar la materia orgánica con el suelo mineral (Honorato, 1993).

La orientación: la exposición de las laderas influye, porque en exposiciones cálidas se produce una mayor tasa de oxidación y descomposición, por otra parte las laderas orientadas en sentido de avance de la tormenta, se acelera el proceso de escorrentía (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

La precipitación: la intensidad y frecuencia de las tormentas son variables que al ser mayores aumentan la escorrentía superficial, siempre que la intensidad sea mayor que la velocidad de infiltración (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

2.3.3 Comportamiento, características del sedimento y su relación con el caudal

Cualquier alteración, principalmente por cambio de uso del suelo tiene influencia directa en la producción de sedimentos en una cuenca (Rodríguez, 1991; Calder, 1992; Oyarzún, 1994; Mayen, 2003).

Sedimentos en suspensión provenientes de cuencas forestadas, presentan altos contenidos de material orgánico, asociado a la fracción mineral. Esta materia orgánica proviene principalmente de la vegetación ripariana.

El sedimento arrastrado por el fondo de la red hídrica, esta compuesta principalmente por partículas inorgánicas propias del cauce. Su dinámica no es utilizada para medir o estimar calidad de agua, sin embargo tienen importante implicancia en los organismos acuáticos, porque influyen el substrato y la morfología del canal.

Según el manejo que se de a los residuos después de una tala rasa, la distribución granulométrica es distinta, ya que la escorrentía superficial tiende a mover partículas más pequeñas y livianas de la superficie del suelo. Esta selectividad a menudo causa

que los sedimentos erosionados difieran de las características físico químicas, del suelo del que se han originado (Young *et al.*, 1986; Oyarzún, 1994).

La producción de sedimentos en suspensión, relacionado con el caudal medio, es un buen índice para medir erosión. Sin embargo, las características físicas y químicas de estos son importantes, ya que afectan el transporte y depositación; por otro lado sirven para evaluar la concentración potencial de contaminantes provenientes de pesticidas, herbicidas y fertilizantes (Oyarzún, 1994).

Las concentraciones de sedimento en suspensión varían en su relación con el caudal, según la época del año que se estudie. Para las zonas templadas es esperable un aumento en la época con lluvias y una disminución en la época estival (Jones & Swanson, 2001; Mayen, 2003).

La concentración de sedimento en general sigue el siguiente patrón: se incrementa en la curva ascendente al hidrográma, se hace máxima en un punto antes o después de el caudal máximo y decrece relativamente rápido al acercarse al caudal base. Cambios en la concentración de sedimentos en eventos de tormenta pueden ser usados para demostrar efectos de cambios de uso del suelo (Conesa, 2000).

Lorente *et al.* (2000), describió tres patrones de comportamiento del sedimento en suspensión en eventos de lluvia:

El primero corresponde cuando el pick en la curva de sedimento, precede al pick del caudal. Este desfase se asocia a lluvias cortas y no necesariamente intensas, donde la producción de sedimento se relaciona bastante bien con el momento de máxima intensidad de precipitación. Por otra parte el autor señala que es más frecuente que el pick se manifieste junto o incluso con cierto retraso del pick de caudal.

El segundo corresponde cuando el pick mayor de la curva de sedimento se produce cuando ya se ha iniciado el tramo descendente del hidrograma. Esto puede suceder por la caída de un talud desestabilizado o de sedimento depositado en la red de drenaje. Este patrón se asocia generalmente a cuencas pequeñas, donde leves movimientos de masa de corta duración, tienen grandes repercusiones en el transporte de sedimento. No obstante otros pick menores pueden manifestarse durante la curva de crecida.

En el tercer patrón se identifican dos o más pick de caudal durante crecidas de larga duración. La característica de este segundo grupo de crecidas, es que el segundo pick de sedimento es notablemente inferior al primero. Esto se explicaría por un agotamiento en la fuente de sedimento en el cauce o a la mayor importancia que del caudal base al momento del segundo pick, y por último a un proceso de dilución por el mayor suministro de agua limpia de las zonas cercanas al cauce.

2.4 Efecto de la actividad forestal en la producción de agua y sedimentos

Se ha demostrado que el desarrollo de plantaciones ejerce un efecto significativo sobre la cantidad de agua que llega al suelo. Esta varía según la especie, la densidad de plantación, la edad de la misma y las precipitaciones.

La remoción de la cubierta vegetal produce generalmente un aumento en el rendimiento hídrico de una cuenca, superando los niveles registrados antes del disturbio, principalmente después de la cosecha y durante el periodo de establecimiento de una nueva cubierta vegetal, que puede ser de uno a tres años (Bruijnzee, 1997).

Cuando los montos de evapotranspiración se ven disminuidos por la cosecha forestal, se puede esperar un aumento en la producción de agua, caudales medios y caudales *pick* de la cuenca intervenida (Jones y Grant, 1996; Chang y Watters, 1984).

En relación con la producción de sedimentos, durante el periodo de cosecha se produce el mayor porcentaje de pérdidas de suelo y de producción de sedimentos en los cauces, que pueden ocurrir durante una rotación (Iroumé *et al.*, 1989). Sin embargo Rothwell (1978), señala que el daño provocado en las cuencas hidrográficas no se debe a la eliminación de la vegetación, sino mas bien del método utilizado cuando son removidos los bosques (sistema de cosecha, creación de vías de saca). En numerosos estudios, cuando los árboles en una cuenca hidrográfica han sido cortados y dejados sobre el terreno, la erosión no aumento significativamente. En general, el disturbio del suelo y el potencial de erosión aumentan con el número de troncos o volumen removido por unidad de superficie.

El reemplazo de ciertos cultivos y pradera por plantaciones, genera un aumento en el nivel de cobertura y consecuentemente lleve hacia una mayor estabilización del suelo.

Por otro lado las plantaciones tienen un efecto positivo en lo que se refiere a su establecimiento sobre suelos degradados o con riesgo potencial de erosionarse, ya que allí se espera una estabilización de los suelos, menores tasas de erosión y una regulación de la calidad y cantidad de agua generada (Gayoso e Iroumé, 1995).

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Material

3.1.1 Ubicación cuenca de estudio, clima y características del suelo

La cuenca se ubica al oeste del sector de Ciruelos, en el predio Aragón de la Forestal Tornagaleones S.A., en la provincia de Valdivia. Esta cuenca durante el estudio fue afectada por una tala rasa que abarcó aproximadamente un 50% de la superficie, esta intervención se ubicó en la parte superior de la cuenca.

El cuadro 1 describe la superficie por el uso de suelo de la cuenca. Antecedentes dasométricos de la plantación y las características principales del suelo, se mencionan en el cuadro 2.

Cuadro 1. Superficie por uso de la cuenca.

Plantación (ha)	14,38
Buffer	3,46
Total (ha)	17,84

El 80.6 % de la superficie se encuentra bajo una plantación de *Pinus radiata* de 28 años, con densidad de 770 árboles/ha, cobertura de copas media de 65%, altura media de 27 m, con área basal de 40.37m² y DMC de 36 cm. La vegetación acompañante esta compuesta principalmente de especies nativas, en estado de latizal, compuestas principalmente por *A.punctatum*, *E. cordifolia*, *E. trichosperma*, *G. avellana*, *L. apiculata*, y Mirtaceas, el sotobosque esta compuesto por *R. spinosus*, *G. spacealata*, y abundante presencia de *Ch. quila*, teniendo esta mayor presencia en zonas cercanas al cauce, además están presentes abundantes Epifitas como *L. rosea*.

La zona buffer, cuyo ancho es variable (entre 3 y 8 m horizontales) al borde del cauce, se compone principalmente por *Ch. quila*, *Lophosoria cuadripinata* y mirtaceas en general.

El clima de la zona corresponde a templado lluvioso, con influencia mediterránea estación seca corta, presentando una precipitación promedio anual de aproximadamente 2.500 mm y una temperatura media anual de 12° C (Fuenzalida, 1971). Las lluvias presentan una distribución temporal muy marcada durante el año, con los máximos aportes entre mayo y agosto, y los mínimos en verano (Dirección General de Aguas, 1987).

El suelo de la cuenca es rojo arcilloso, moderadamente profundo a profundo (mayor a 1 m), en algunas partes muy puntuales (ladera alta) de la cuenca se observó afloramientos de conglomerado metamórfico. En los primeros centímetros del horizonte A (0 a 3 cm) se observan flóculos de gran tamaño entre 3 y 5 mm, producto de la mezcla de materia orgánica y suelo mineral, esto origina una

estructura grumosa bien diferenciada que disminuye en profundidad. Con respecto al mantillo tiene aproximadamente 3 cm promedio de espesor y esta compuesto principalmente por acículas de *P. radiata*, con distinto grado de descomposición, clasificándose según Schlatter *et al.*(2003) como Moder.

Las características del mantillo y del sotobosque son importantes, en la reducción de disminución de la energía cinética de la lluvia y en los procesos de escorrentía superficial.

Mayor detalle de los horizontes se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Características generales del perfil de suelo.

Hz	Profundidad (cm)	Textura	Estructura	Consistencia (seco)
A	0-30	Franca	Grumosa	Blando
AB	30-46	Franca arcillosa	Sub. poliedrica	Lig. Duro
B	46-más	Franca arcillosa	Sub. poliedrica	Lig. Duro

Bonelli y Schlatter (1995) determinaron que los suelos rojo arcillosos de la zona centro sur de Chile tienen una porosidad gruesa entre un 15 y 22% y el volumen total de poros varia entre un 53 y 68 %. Lo referente a la porosidad gruesa, es importante porque otorga una idea de la capacidad de infiltración del suelo, el cual se limita con un volumen menor a un 10%. Por otra parte el volumen total de poros representa la capacidad de almacenamiento y movimiento del agua en el suelo (Schlatter *et al.*, 2003).

3.1.2 Caracterización geomorfológica de la cuenca

Para determinar la ubicación y superficie de la cuenca, se hicieron visitas a terreno. Se utilizaron fotografías aéreas y cartografía digital, facilitadas por Forestal Tornagaleones S.A.

3.1.3 Registro de la precipitación

Se utilizó un pluviógrafo del tipo *Tipping bucket* (marca HOB0 Event), con una sensibilidad de 0.2 mm.

3.1.4 Medición de caudales

Se aforó el cauce, utilizando un vertedero del tipo Thompson, con un ángulo en “V” de 60° Que presenta la ventaja de adecuarse bien a pequeños caudales. En él se instaló un limnógrafo que registra la carga hidráulica, almacenando la información a un *data logger*, que permite registrar la carga hidráulica con una frecuencia de 6 minutos.

3.1.5 Muestreo de agua

Se utilizó una bomba pequeña para capturar muestras de agua, ubicada en la parte media del vertedero y activada desde el *datalogger* con una frecuencia de 60 minutos de muestreo. La bomba tomó una muestra de agua proporcional al caudal del momento, la que fue almacenada en un recipiente de 20 litros de capacidad ubicado a un costado del vertedero.

3.1.6 Cuantificación de sedimento en suspensión

Para cuantificar el sedimento de las muestras de agua colectadas, se utilizó un sistema de filtrado; consistente en un matraz conectado a un motor que genera vacío, lo que provoca la succión del agua. Se utilizó papel filtro especial de fibra de vidrio, que permite someterlo a altas temperaturas, con el fin de obtener la proporción de sedimento inorgánico y orgánico. El pesaje del sedimento se realizó con una balanza con precisión de 0.0001 gr.

3.1.7 Periodo de estudio

Se consideró el periodo comprendido entre agosto de 2004 y julio de 2005

3.2 Metodología

3.2.1 Caracterización geomorfológica de la cuenca

Según la metodología explicada en Martínez de Azagra y Navarro (1996), se desarrollaron los siguientes parámetros geomorfológicos.

Índice de compacidad (Gravelius), altitud media, coeficiente orográfico, densidad de drenaje, frecuencia de corrientes y coeficientes de torrencialidad, curvas hipsométricas y curvas de distribución. Detalle de la formulas utilizadas en anexo 3.

3.2.2 Caracterización de la vegetación y suelo de la cuenca

Se realizaron tres parcelas de 500 m² (20x25 m), distribuidas en forma dirigida en la parte alta, media y baja de la cuenca, con fin de obtener las variables dasométricas (DMC, área basal, altura dominante, densidad, cobertura arbórea).

Las zonas de protección se caracterizaron con parcelas de 15 m² (5 x 3m) y se registro cobertura y especie dominante.

Se describió el perfil de suelo de acuerdo a las metodologías descritas en el manual de reconocimiento de suelo (Schlatter *et al.*, 2003), para la variable: textura, estructura, espesor de los horizontes, profundidad, consistencia y resistencia a la penetración.

3.2.3 Procesamientos de los valores de precipitación

Las precipitaciones se agruparon a intervalos de media hora, de esta manera se construyeron los montos de precipitación diarios y mensuales.

3.2.4 Registro del caudal

Se programo el *logger* para que cada 6 minutos registre la carga hidráulica. Posteriormente se estableció la equivalencia entre la carga hidráulica y el caudal expresado en m³ (formula 2), Los valores de caudal se agruparon igualmente cada media hora y se obtuvo el valor promedio. Con estos valores se determinaron totales cada media hora, diarios y mensuales.

3.2.5 Determinación de caudales

El caudal se determino con los registros de la estación de aforo, utilizando la siguiente fórmula:

$$Q = C * \tan \frac{\beta}{2} * h_1^{5/2} \quad (2)$$

Donde:

C: Coeficiente de descarga.

β : Angulo en "V" (60°).

h_1 : Carga hidráulica del vertedero (m).

Al considerar que el agua llega con velocidad cercana a 0 al fondo del vertedero y el ángulo en "V" de 60°, la ecuación se reduce a la siguiente expresión:

$$Q = 0,771 * h_1^{2,47} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

3.2.6 Captura de muestras de agua

Cada 60 minutos se tomó una muestra de agua proporcional al caudal. Las muestras de agua recolectadas eran integradas a un recipiente de 20 l de capacidad ubicado en una caseta al costado del vertedero.

3.2.7 Obtención de los sedimentos para los periodos mensuales

De toda el agua almacenada en el recipiente de 20 litros se obtuvo mensualmente tres sub muestras homogenizadas de dos litros cada una. Posteriormente en laboratorio se determinó el peso seco del material filtrado expresándolo en miligramos/litro.

3.2.8 Obtención de sedimentos a escala horaria

Se siguieron 3 eventos en distinta época del año (2 en primavera y 1 en invierno). Utilizando el mismo sistema de captura de muestras de agua (incluido el tiempo de

muestreo). La diferencia radicó en que cada muestra horaria era guardada en una botella aparte, etiquetada con la fecha y hora que fue tomada, de manera que se correlacionara con el caudal al momento de muestreo.

3.2.9 Análisis del comportamiento del caudal

Se agruparon las precipitaciones y escorrentía a niveles diarios, todos los valores fueron llevados a mm. Posteriormente la fracción de la escorrentía que corresponde al caudal base se determinó según el método gráfico recomendado por Martínez de Azagra y Navarro, (1996) además se determinó el coeficiente de escorrentía. Esta información se agrupó a nivel mensual. De esta forma se observó las variaciones de la escorrentía y del caudal base en el transcurso del estudio.

3.2.10 Análisis del comportamiento del caudal en eventos de tormenta

Se analizaron 4 eventos de tormenta ocurridos en distinta época del año. Los eventos fueron los mismos que se utilizó para conocer la relación de CSS / caudal, más un evento en verano. Cada media hora se sumaron los caudales y se obtuvo el caudal promedio. Para el mismo intervalo de tiempo se determinó la cantidad de agua precipitada. De esta manera se construyeron hidrogramas, de los cuales se obtuvo la siguiente información:

Duración del evento (h), precipitación total (mm), intensidad promedio (mm/h), tiempo de respuesta (h), tiempo de crecida (h), tiempo base (hr), caudal punta (l/s), caudal base (l/s), aumento del caudal base (%).

Se determinaron tres puntos o elementos dentro del hidrograma (figura 1):

Punto A: hasta este punto el caudal corresponde únicamente a los aportes de aguas subterráneas, a partir de ahí se incorpora la escorrentía superficial.

Punto B: se produce el caudal máximo.

Punto C: el flujo vuelve a ser originado por aguas subterráneas, ya que la escorrentía superficial a cesado.

Tiempo de respuesta: es el intervalo entre el pick de la precipitación hasta el caudal punta.

El tiempo de crecida, es el intervalo entre en inicio de la escorrentía superficial y el caudal punta del punto A al B.

El tiempo base, es la duración total del flujo de agua superficial, del punto A al C.

El tiempo de concentración es el tiempo máximo de circulación del agua de escorrentía superficial hasta el punto de salida del agua de la cuenca, este periodo es característico de cada cuenca, y por lo tanto independiente del evento.

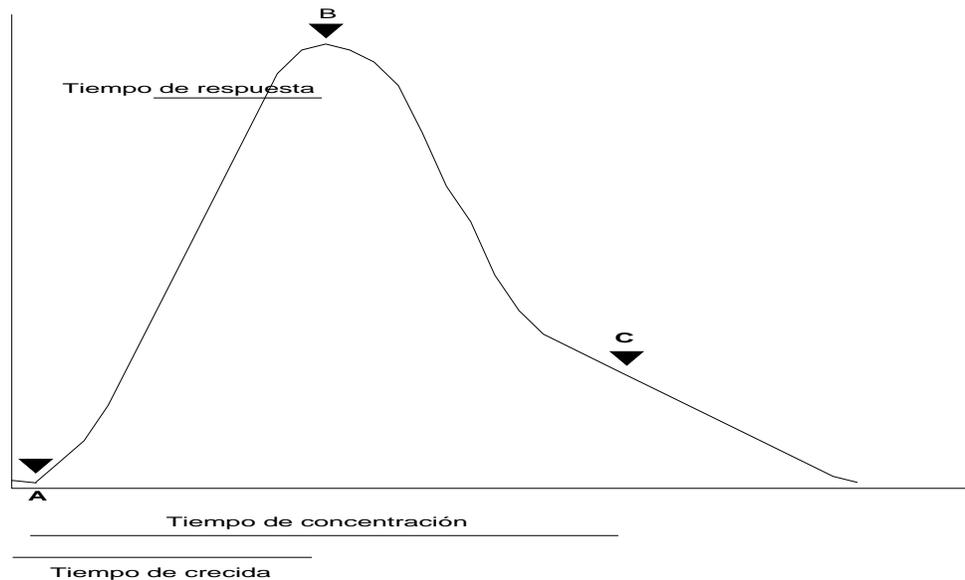


Figura 1. Hidrograma tipo modificado de Martínez de Azagra y Navarro (1996).

3.2.11 Relación Concentración de Sedimentos en Suspensión (CSS) / Caudal medio

Para determinar esta relación a escala mensual se utilizó el valor promedio de CSS para cada mes (razón entre el total mensual de sedimentos en suspensión v/s la cantidad total de litros exportados) y el caudal medio mensual (l/s).

Para el caso de análisis por eventos se utilizó el caudal instantáneo al momento de tener la muestra de agua con la CSS de esa muestra de agua:

Tanto para el periodo mensual como para los eventos, se utilizó una relación simple de transporte (Müller y Förstner ,1968; Iroumé, 1990).

$$CSS = a * Q^b \quad (4)$$

Donde:

CSS: Concentración de Sedimentos en Suspensión (mg/l)

Q: Caudal medio (l/s)

a, b: Parámetros

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Geomorfología de la cuenca

A continuación se presentan los parámetros geomorfométricos utilizados para caracterizar la cuenca, así también los parámetros que caracterizan los cauces. La fotografía aérea de la cuenca esta en el anexo 2

Cuadro 3. Características de la superficie.

Superficie (km ²)	0,178
Perimetro (km)	1,930
Índice de Gravelius	1,28

La superficie de la cuenca es apropiada para establecer relaciones con ciertas precisión, entre precipitación, generación de caudales y producción de sedimentos según Lorente *et al.* (2000), ya que es menor a 100 ha.

Según el valor del índice de Gravelius, la cuenca presenta una forma ovalada, esta forma hace que el agua que circula en la cuenca, lo haga por más cauces secundarios y su tiempo de concentración sea mayor que en otra forma de cuencas como las alargadas (cuadro 3).

Cuadro 4. Parámetros morfométricos.

Índice de pendiente media	51.7
Altura mínima (m s.n.m.)	30
Altura máxima (m s.n.m.)	270
Altura media (m s.n.m)	196
Coeficiente orografico (m/km ²)	155002

La cuenca, tiene una diferencia de 250 m de altura entre sus valores extremos, un valor medianamente alto de pendiente media y un alto valor de coeficiente orográfico, indicando que es de relieve acentuado.

Estos parámetros son de importancia, pues dan un índice de la velocidad media de la escorrentía, su poder de arrastre y de la erosión que afecta a la cuenca. Esto es útil cuando se comparan comportamientos hidrológicos entre cuencas (cuadro 3 y 4).

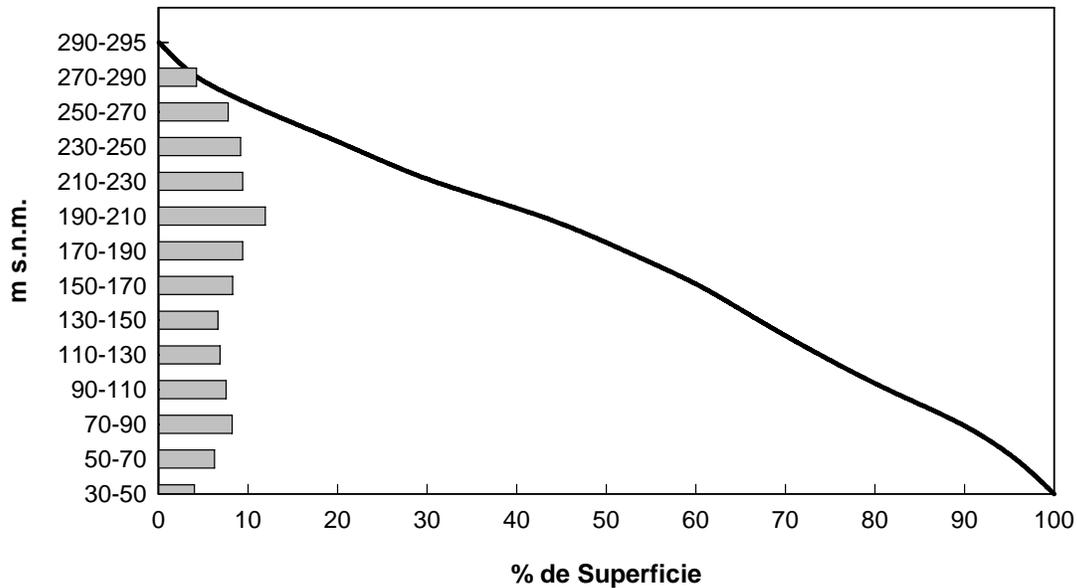


Figura 2. Curva hipsométrica y de distribución para la cuenca en estudio.

La curva hipsométrica muestra que la pendiente de la cuenca es relativamente constante, esta curva además de ofrecer una idea del relieve y altimetría. La curva se asocia a la edad del cauce de las cuencas (Martínez de Azagra, 1996; Vélez, 2003). Correspondiendo el perfil de la cuenca a un cauce joven. La curva de distribución muestra que la mayor superficie (11.9%) se ubica en la cota 190-210 m s.n.m. En el resto de rangos altitudinales los porcentajes de distribución oscilan entre un 6% y 9%, la estación de aforo se ubica en los 30 m s.n.m. y el porcentaje de participación de esta cota es de 4%.

Cuadro 5. Parámetros físicos relacionados con la red de drenaje.

Coefficiente de torrencialidad (1/km ²)	70,1
Densidad de drenaje (km/km ²)	6,2
Longitud red hídrica (km)	1,1
Tiempo de concentración (h)	
Temez	0,31
Bruce y Clark	0,65
Promedio	0,48

La red de drenaje de la cuenca se compone, según la clasificación de Horton y Strahler, por dos cauces de orden 1 que componen el 32% del total de la red de drenaje y 1 cauce de orden 2 con un 68% del total de la red. Se muestra que los valores de la densidad de drenaje, son bajos, esto se asocia a una alta resistencia a la erosión, con suelos permeables y de bajo relieve. Valores altos son encontrados generalmente en zonas montañosas e impermeables (cuadro 5).

El tiempo de concentración promedio es de 0.48 hrs. Indicando el tiempo teórico máximo de circulación del agua de escorrentía superficial, hasta el punto de control

de la cuenca. Este tiempo es característico de cada cuenca y por lo tanto independiente del evento.

4.2 Precipitación y Escorrentía generados mensualmente

Este capítulo muestra la variación de los montos precipitados y escorrentía total generada. Se analiza el comportamiento de los coeficientes de escorrentía y su relación con el caudal base.

Cuadro 6. Precipitación (PP), escorrentía (Esc), caudal base (Qb), relación caudal base/ escorrentía (%) y coeficiente de escorrentía (%) mensual.

Año	Mes	PP (mm)	Esc.(mm)	Qb (mm)	Qb/Esc.(%)	Coef.Esc.
2004	Agosto	216,8	180,6	100,7	55,8	0,9
	Septiembre	177,7	121,8	74,4	61,4	0,7
	Octubre	185,6	98,3	74,4	76,0	0,5
	Noviembre	111,4	95,1	87,0	91,6	0,9
	Diciembre	87,4	67,8	65,1	96,1	0,8
2005	Enero	38,8	48,0	47,0	97,8	1,2
	Febrero	2,0	33,3	33,3	100,0	16,66
	Marzo	118,2	37,4	31,6	84,6	0,3
	Abril	80,4	30,2	27,0	89,7	0,4
	Mayo	867,4	275,9	40,0	14,5	0,3
	Junio	625,4	388,2	107,3	27,6	0,6
Total		2511,1	1376,6	687,8	49,9	0,5

La precipitación total durante el periodo de estudio fue de 2.535,1 mm. Esta se registró principalmente a fines de invierno y principios de la primavera del año 2004 (agosto a noviembre) y a finales de otoño e invierno del año 2005 (mayo a julio), equivalentes a 27.2 y 58.8% respectivamente. Considerando los once meses de estudio y de acuerdo con Fuenzalida (1971) los montos precipitados serian levemente superiores a un año normal, pero con una distribución temporal anómala. Destaca que en la época estival, en particular enero y febrero los bajos montos de precipitación, que representan en conjunto el 1.6% del total anual. Por otro parte, mayo fue un mes extremadamente lluvioso que apporto el 34.2% del total anual.

La cantidad total de agua que exportó la cuenca fue equivalente a 1.401,9 mm. La escorrentía generada a medida que se avanza a la estación estival tiende a disminuir, continuando esta tendencia hasta abril, mes en el cual se produce el valor más bajo. Esto coincide con el fin del año hidrológico. Posteriormente en el mes de mayo hay un fuerte aumento en la escorrentía (aproximadamente 10 veces más en proporción con el mes anterior), debido a la alta cantidad e intensidad de las precipitaciones durante este mes.

El coeficiente de escorrentía total que presentó la cuenca fue de 0.54. Valores similares de 0.53 y 0.44 fueron encontrados por Iroumé (1992) para una cuenca cercana a Valdivia. El valor 0.53 corresponde a un año con un monto total de

precipitación similar al del periodo de estudio, por otro lado el valor 0.44 corresponde a un año muy seco.

Los coeficientes de escorrentía para fines de invierno y la primavera del año 2004 varían entre un 53 y 85%. Se observa un descenso entre agosto y octubre y un aumento en noviembre y diciembre. Este desfase es explicado por la recarga de agua en el suelo producto de las precipitaciones de octubre y noviembre principalmente.

En el verano los valores del coeficiente de escorrentía son notablemente superiores, especialmente en febrero. Esto evidencia la gran capacidad de almacenaje de agua en el suelo, ya que en este periodo las precipitaciones fueron muy bajas y la escorrentía generada fue sub superficial.

Esta capacidad quedo en manifiesto, ya que durante la estación estival es donde se produce un mayor consumo de agua, principalmente por la actividad fisiológica de la vegetación, además del aumento de la capacidad de intercepción de la cubierta arbórea.

Autores como Hernández (1998) y Huber e Iroumé (2001) señalan que las perdidas por intercepción pueden llegar a niveles de 11 y un 22% en un valor medio anual.

Para los procesos de evapotranspiración se estimó un valor aproximado de 43.3% en promedio anual (Hernández, 1998), todos los valores para un rodal de similares características.

Entre marzo y mayo bajan los valores de los coeficientes de escorrentía, presentando una menor variación (entre un 32 y 38%). El valor de mayo es muy bajo en comparación con el agua que precipitó durante este mes. Esto se explica por la recarga del suelo. Huber y Lopez (1993) señala que la reducción puede llegar hasta los 2.8 m de profundidad, en un terreno bajo plantación. De modo que las precipitaciones de mayo debieron contribuir a recargar las reservas de agua del suelo.

En relación a la fracción de la escorrentía que se manifiesta como caudal base, esta presenta un amplia variación (entre un 14.7 y 100%), siendo en promedio un 49.9% de la escorrentía total. Se aprecia un aumento constante desde agosto hasta febrero. Esto refleja que a medida que se avanza al verano los procesos de escorrentía superficial disminuyen, en cambio, la escorrentía sub superficial representados por el caudal base se hacen más importantes.

Posteriormente, con la reanudación de las precipitaciones la participación del caudal base disminuye gradualmente hasta abril. Para mayo el valor es muy bajo (14.5%), en comparación con el mes anterior que fue de 89.7%. Esto se debe en parte a la alta cantidad e intensidad de las precipitaciones y al efecto que pudo tener la tala rasa. Ambos factores traen como consecuencia que la escorrentía superficial sea el componente dominante. Por otra parte, el agua que logro infiltrar, solo contribuyó a

recargar las reservas del suelo y en una proporción muy baja manifestarse como caudal base.

4.3 Precipitación y caudales generados diariamente

La figura 3 muestra los valores y las tendencias de las precipitaciones, la escorrentía generada y el caudal base diario (mm) para los meses estudiados.

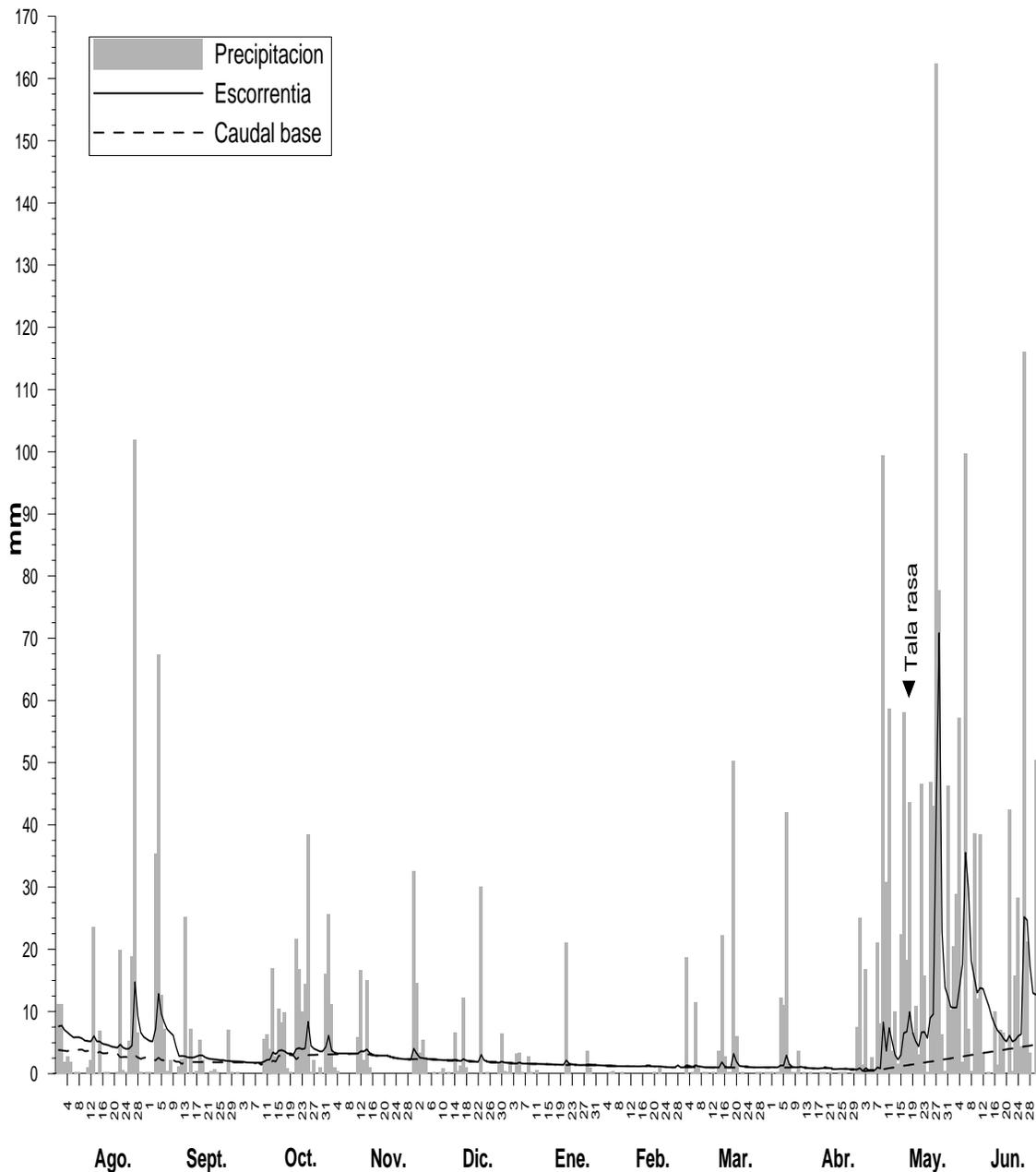


Figura 3. Precipitación, escorrentía total y caudal base (mm/día) para el periodo de estudio, el símbolo señala la fecha que comenzó la tala rasa.

En la figura 3, se aprecia que desde agosto hasta abril, disminuye la intensidad y cantidad de las precipitaciones. Estas se reactivan en mayo, donde presenta elevados valores.

La escorrentía sigue la misma tendencia, baja de agosto a septiembre, posteriormente debido a las precipitaciones de octubre, se produce un aumento, para continuar con la tendencia de descenso hasta abril. Se observa que las precipitaciones ocurridas entre el 1 y el 3 de mayo (43.2 mm en total) no tuvieron un efecto inmediato en la generación de escorrentía y estas contribuyen principalmente a recargar las reservas de agua del suelo. El aumento en el caudal ocurre el día 9 de mayo, sin duda por la alta intensidad de la precipitación (figura 3).

El caudal base sigue la misma tendencia de la escorrentía total, en valor absoluto, baja de agosto a septiembre, posteriormente sube en octubre y continua bajando hasta abril. En términos relativos aumenta su importancia, ya que el agua que exporta la cuenca entre diciembre y abril se compone de este tipo de flujo. Durante mayo aumenta en valor absoluto, sin embargo disminuye su importancia relativa, porque el agua exportada es producto principalmente de escorrentía superficial.

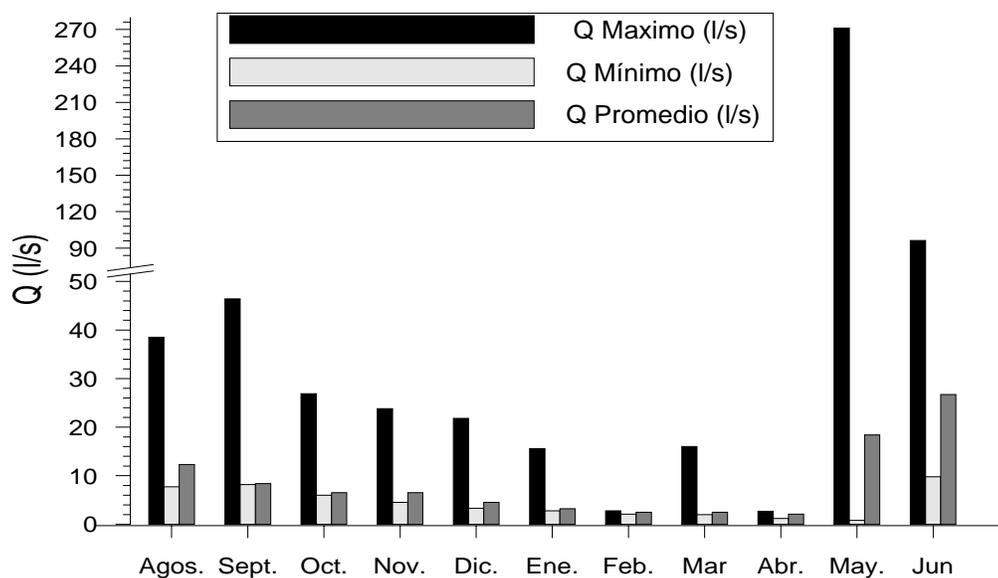


Figura 4. Caudales mensuales (l/s), máximos, mínimos y promedios.

La figura 4, muestra que la cuenca exportó durante el período de estudio en promedio 9.06 l/s, teniendo esta una gran variabilidad estacional. Con respecto a los valores promedio el mínimo ocurrió en abril con 2.1 l/s y el máximo en junio con 26,7 l/s. Los valores extremos fueron 0.8 l/s el mínimo y 271.2 l/s el máximo, ambos valores ocurridos durante mayo. El valor mínimo se explica por el agotamiento en las reservas de agua en el suelo, producto de procesos de evapotranspiración y de interceptación explicado anteriormente. Con respecto al valor máximo se explica en parte por las altas intensidades y cantidad las precipitaciones de ese mes.

Al comparar la cantidad de escorrentía generada en eventos de alta intensidad ocurridos pre y post cosecha, se evidenciaron grandes diferencias. En el evento pre cosecha ocurrido en agosto, precipitaron 101.8 mm y la escorrentía total generada fue de 14.7 mm, caudal máximo 38.5 l/s y caudal base 8.1 l/s; en comparación con el evento post cosecha ocurrido en mayo, donde cayeron 162.3 mm, genera una escorrentía total de 40.8 mm, el caudal máximo fue 271.2 l/s y caudal base 4.4 l/s (figura 3).

La anterior afirmación significa en términos relativos, que en el evento de mayo, si bien las precipitaciones fueron 62.7 % mayor, se generó 2.7% más escorrentía y un caudal máximo 7 veces mayor en comparación con el evento de agosto. No obstante que en este mes el nivel de humedad del suelo era superior, ya que presentó un caudal base mayor. Por lo que la cuenca en condiciones inalteradas durante el evento de mayo no debió haber generado tanta escorrentía y menos un caudal punta tan alto.

Esto refleja que la tala rasa, que abarcó aproximadamente al 50% de la cuenca, aumentó la escorrentía superficial, debido a la eliminación de la vegetación. Ya que esta tiene un rol protector y atenuador en la generación de escorrentía y de caudales punta principalmente por los procesos de redistribución de las lluvias (Iroumé y Huber, 2000).

Tendencias similares son discutidas por Mayen (2003), que determinó que el caudal medio diario post cosecha, aumentó tres veces en relación al periodo pre cosecha. Respecto a caudales instantáneos el mismo autor analizó situaciones de verano e invierno y encontró que los de verano aumentan en un 62%, mientras que en invierno tuvo diferencias de 72 a 400% con respecto al periodo pre cosecha. Todas las diferencias fueron estadísticamente significativas.

Jones y Grant (1996), encontraron que los cambios de caudales máximos asociados a talas rasas aumentaron sobre un 50% en cuencas menores a 100 ha. Estos cambios fueron atribuibles a procesos que tienen relación con la redistribución de las precipitaciones y al efecto directo de la cosecha sobre propiedades del suelo.

Rodríguez (2003) analizó el efecto del raleo al 50% en la generación de caudales, encontrando un aumento del 16% del caudal post raleo. Estas diferencias no fueron estadísticamente significativas, sin embargo cuestiona esta conclusión por el poco tiempo de estudio.

4.4 Análisis de eventos de tormenta

Este capítulo describe y analiza el comportamiento hidrológico de la cuenca ante eventos en distinta intensidad y épocas del año.

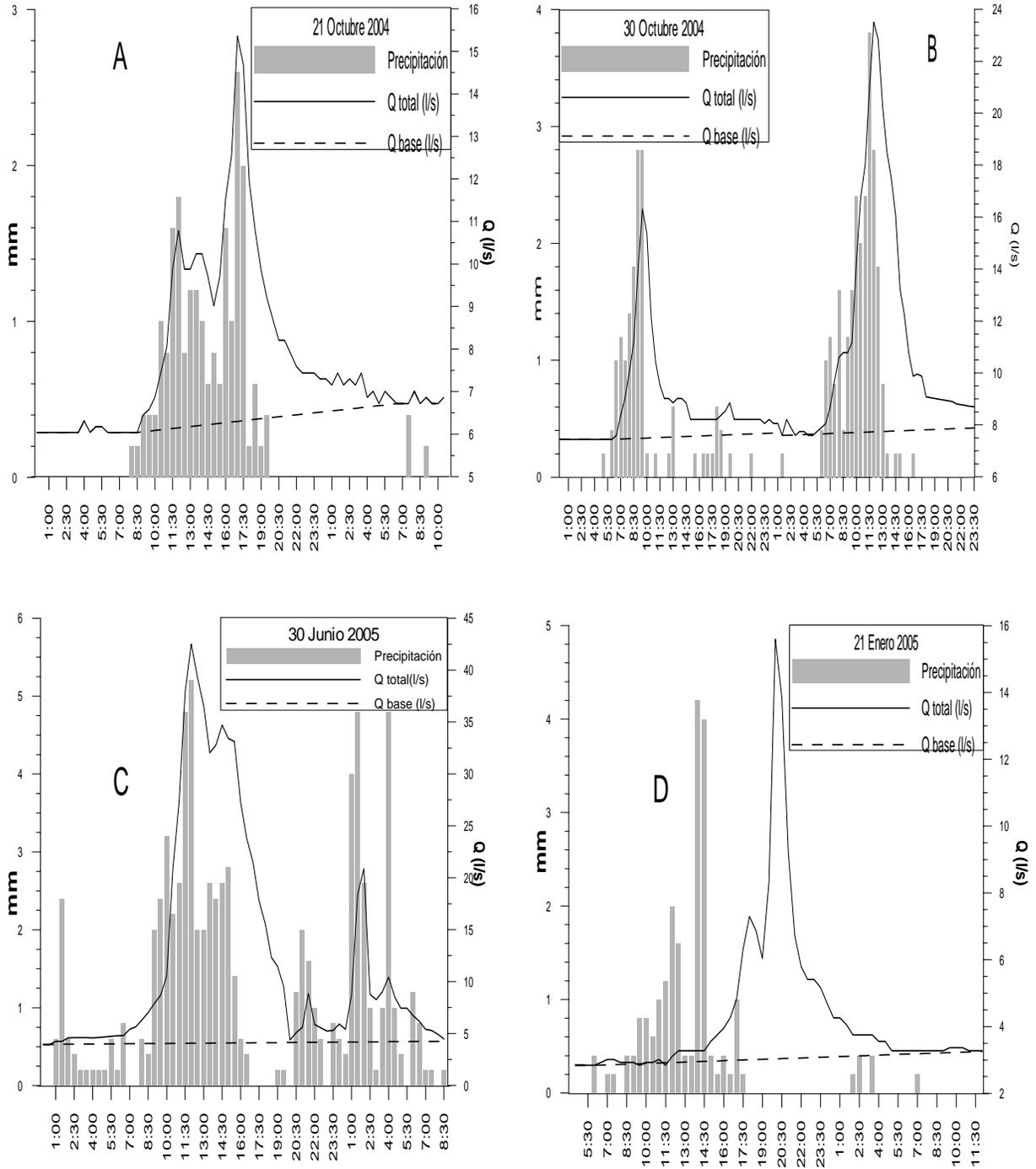


Figura 5. Hidrogramas para los eventos, A: registrado 21 octubre 2004; B: registrado 30 octubre de 2004; C: registrado 30 junio de 2005; D: registrado 21 enero de 2005.

Cuadro 7. Resumen de los parámetros utilizados para caracterizar los eventos.

	A	B	C	D
Duración evento (h)	34,5	48,5	33,5	32,5
Precipitación total (mm)	22,2	41,2	77,8	22,2
PP acum. 48 hrs antes (mm)	0,2	1	3,4	0
Tiempo de respuesta (h)	0,1	0,5	0,1	6
Tiempo de crecida (h)	3,5 - 8*	3,5 - 6,5*	11,5	14,5
Tiempo base (h)	21,5	19,5 - 21	23,5	30,5
Caudal punta (l/s)	15,4	16,3	42,5	15,6
Caudal base inicio (l/s)	6	7,6	4	2,8
Caudal base final (l/s)	6,7	7,9	4,3	3,3
Aumento de Caudal base(%)	10,4	3,7	6,9	15
Volumen total de agua (m ³)	983,8	1721,35	1479,9	493,4
Volumen promedio de agua (m ³ /h)	28,5	35,5	44,2	15,2
Esc. superficial promedio(m ³ /h)	5,3	8,3	29,6	0,0
Intensidad promedio (mm/h)	0,6	0,8	2,3	0,7
Esc. superficial total (%)	18,7	23,7	67,0	29,14**

* Presento dos crecidas ** Corresponde a escorrentía sub superficial

Las características generales de los eventos seleccionados son: Eventos A, C y D, tienen similar duración, con excepción del evento B, que posee 16 horas más. A todos los eventos los antecede 48 h, donde prácticamente hubo ausencia de precipitación. Por otra parte, los de menor e igual intensidad son A y D, ocurridos en octubre y enero respectivamente. El de mayor intensidad es el C, seguido por el evento B.

Al comparar los eventos ocurridos durante octubre (eventos A y B), se observa que ambos presentan dos pick de caudales (razón por la cual presentan dos tiempos de crecida) producto de la distribución de las precipitaciones. Este tiempo es igual en el primer pick, respondiendo el evento B de forma más rápida en el segundo pick. Situación que se explica por la mayor intensidad de las precipitaciones. Ambos eventos alcanzan similares valores de caudales punta e intensidad promedio, el evento A fue el que presentó mayor incremento en su caudal base y menor escorrentía superficial total. Esto indica que al ser un evento de menor intensidad total, permite que se produzca una mayor infiltración.

Al comparar el evento D que ocurre en verano, con el evento A que ocurre en primavera se observa que ambos poseen similares valores en el monto total de precipitación, en la intensidad, caudal punta y duración del evento. Sin embargo el evento de verano se demoró 6 horas más en el tiempo de respuesta, además tuvo un tiempo de crecida 11.5 veces mayor (figura 5 D y A).

Estas diferencias en los tiempos de respuesta y de crecida, reflejan que en el evento de verano las precipitaciones no generaron escurrimiento superficial. Por lo que el agua logro infiltrar y moverse lateralmente en el suelo. Esto se refleja por el mayor tiempo base del caudal. Razón por la cual en el evento A se genera escorrentía

superficial, mientras que en D, la escorrentía que se origina, corresponde al tipo sub superficial.

Al comparar el evento C ocurrido en julio con el D ocurrido en enero, son muy diferentes entre si, ya que el evento C tiene una intensidad de precipitaciones 3.2 veces superior y un caudal punta 2.7 veces mayor, debido a esto la escorrentía superficial en valor absoluto es superior y su tiempo base es menor en comparación al evento D. Esto es producto del efecto combinado del mayor nivel de saturación del suelo y la ausencia de la vegetación en parte de la cuenca.

Estos análisis demuestran que los procesos de generación de escorrentía cuando la cuenca estaba en condiciones inalteradas, son regulados principalmente por el contenido de humedad del suelo (Morgan, 1997). La fracción del caudal total que se manifiesta como escorrentía superficial en verano puede llegar a ser mínimos o nulos, ya que parte de la precipitación tiene mayor oportunidad de infiltrar. Esto explica el desfase en el pick del caudal en el evento D, por la menor velocidad con que se mueve el agua en el suelo. Al comparar el efecto de distintas intensidades en la generación de escorrentía se imprecisa por las distintas condiciones de cobertura arbórea, que presento la cuenca al comparar el evento C con el D.

4.5 Producción de sedimento en suspensión a Escala Mensual

El siguiente capítulo muestra la variación mensual del sedimento en suspensión; en concentración y el total mensual.

Cuadro 8. Variación de sedimento en suspensión por mes (mg/l) y exportación total mensual (kg/ha).

Año	Mes	Q prom. (l/s)	Qb/esc.(%)	CSS prom.(mg/l)	Total (kg/ha)
2004	Agosto	12,3	55,8	52,6	95
	Septiembre	8,4	61,4	17,5	21,3
	Octubre	6,5	76,0	7,8	7,7
	Noviembre	6,5	91,6	8,9	8,5
	Diciembre	4,5	96,1	8,9	10,2
2005	Enero	3,2	97,8	9,9	4,4
	Febrero	2,5	100	9,5	3,5
	Marzo	2,5	84,6	9,9	4,3
	Abril	2,1	89,7	7,4	3,7
	Mayo	18,4	14,5	1803	4975,3

En relación con la exportación de sedimentos por hectárea, esta tiende a disminuir fuertemente de agosto a septiembre. De septiembre a octubre baja aproximadamente 3 veces. Posteriormente entre los meses de octubre a diciembre, la cuenca exporta una cantidad relativamente constante; entre 7.7 y 10.2 kg/ha. Para los meses de enero hasta abril, se repite una baja en la producción de sedimentos de aproximadamente un 50% con relación al periodo de octubre a diciembre, con

valores de 4.4 y 3.7 kg/ha. En mayo la producción es muy superior a los meses anteriores con valor de 4.9 toneladas.

La fuerte alza ocurrida en mayo en la exportación de sedimento, tanto en cantidad como en concentración, se explica en parte por el aumento del caudal producto de la alta intensidad y cantidad de las precipitaciones de ese mes. Por otro lado, las características morfológicas de la cuenca favorecen el escurrimiento superficial. A estos dos factores, se suman los efectos de la tala rasa. Estos efectos sobre el ambiente físico, tanto en la generación de escorrentía y producción de sedimentos, son ampliamente discutidos por autores como (Iroumé y Gayoso, 1989; Kimmins, 1993; Huber y Lopez, 1993; Waters, 1995).

Para el caso puntual de esta cuenca, la erosión se acentuó por la mala planificación con que se llevo a cabo la cosecha. Principalmente, por la ausencia de técnicas básicas para minimizar su efecto, como el respetar zonas de protección y ordenamiento de los desechos de cosecha.

La carga total de sedimentos por hectárea para mayo son muy superiores a las encontradas para un rodal cosechado de coníferas ubicado en la costa, al sudeste de Estados Unidos, para parcelas con y sin quema de residuos. Los valores promedios fueron de 560 y 1390 kg/ha respectivamente (Robichaud *et al.*, 1993; Rodríguez, 2003).

Oyarzun y Peña (1995) durante dos años en la Cordillera de la Costa, zona centro de Chile, midieron la CSS bajo diferentes niveles de alteración. Tala rasa con quema de residuos, tala rasa con residuos y control. Encontraron que la producción de sedimentos por hectárea, durante los meses más lluviosos, en el primer año de medición fue: 859 kg/ha en la parcela con quema de residuos, 570 kg/ha en la parcela con residuos y 11 kg/ha en la control, y al segundo año de medición, en mayo los valores fueron de 623 kg/ha, 133 kg/ha y 41 kg/ha, para las parcelas con quema de residuos, con residuos y control respectivamente.

Al comparar estos valores, con los resultados obtenidos en este estudio (cuadro 8), se concluye, que las cuencas presentan una misma tendencia en los montos de sedimentos exportados a escala estacional.

Sin embargo la cuenca control ubicada en la zona centro de Chile, exportó menos cantidad de material al compararla con la de este estudio. Esto sin duda por la menor cantidad e intensidad de las precipitaciones. Por lo que la generación de escorrentía fue menor.

El estudio de Oyarzun y Peña (1995), deja de manifiesto, que al eliminar la cobertura, vegetal, en distintos grados del suelo, trae como consecuencia el fuerte aumento en la cantidad de sedimento exportado.

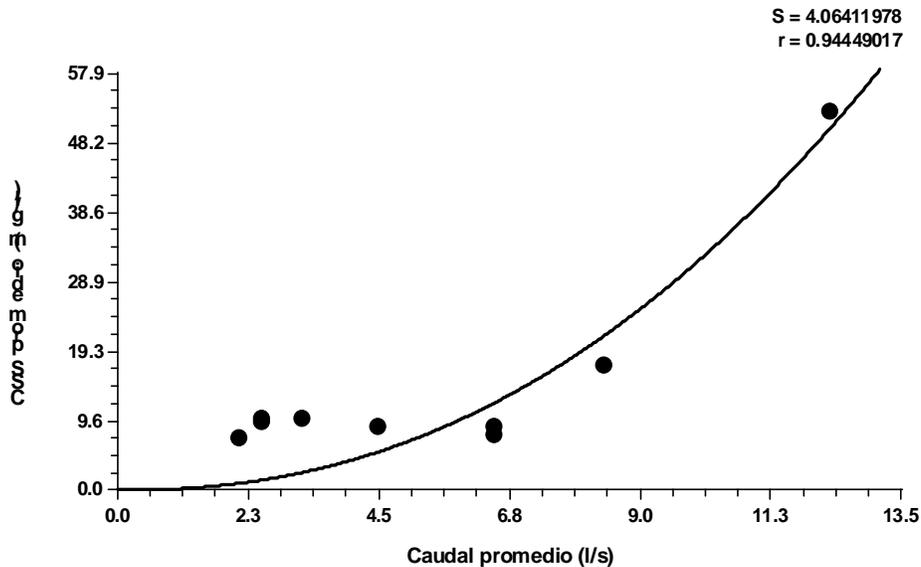


Figura 6. Relación CSS promedio/caudal promedio mensual, para el período de agosto hasta abril.

La figura 6 muestra gráficamente la alta relación, (r^2 de 0.94) que existe entre los valores promedios de caudal y CSS, con la función ajustada en la condición pre cosecha.

En relación a los parámetros “a” y “b” dependen de la cubierta vegetal y de las características climáticas, físicas e hidrológicas de la cuenca. En la ecuación obtenida el valor de “a” es similar al obtenido por valor obtenido por Iroumé (1992) y muy superior al encontrado por el mismo autor para una cuenca de montaña (Iroumé, 2003).

Con respecto a la CSS promedio, entre el mes de agosto a septiembre, se observa que estos tienen la misma tendencia que los valores absolutos de exportación. En el período que va de octubre hasta abril. La CSS promedio es relativamente homogénea, con valores de 7.4 hasta 9.89 mg/l. Los caudales para este período van de 2.5 a 6.5 l/s promedios. Cuando el caudal promedio es mayor a 6.5 l/s, la CSS promedio también tiende a aumentar. En mayo, los valores son muy superiores a los observados durante el estudio, con un valor de 1803 mg/l.

Se explica que la CSS promedio mensual tenga valores similares, porque estos ocurren en el período de primavera verano. Período donde la escorrentía se compone con más de un 75% promedio por caudal base, que corresponde a escurrimiento sub superficial.

En el período de invierno los caudales son mayores y los escurrimientos superficiales son más importantes, por lo tanto los procesos erosivos dentro de la cuenca aumentan.

Las diferencias de las CSS entre las estaciones demuestran que el contenido de humedad del suelo influye indirectamente en la respuesta de la cuenca respecto a la

producción de sedimentos. En invierno el suelo se encuentra con un mayor contenido de humedad, por lo que el proceso de infiltración es más lento y menor. Este mayor contenido de humedad además disminuye la cohesión y estabilidad de los agregados y esta disminución de su tamaño, aumenta la probabilidad de que el flujo superficial los arrastren hasta el la red de drenaje (Morgan, 1997).

Similares tendencias, en la variabilidad de la relación entre CSS y caudal promedio encontrados en esta la cuenca de estudio, son descritas por Lorente *et al.* (2000). Este autor encontró, que durante la estación invernal, la relación entre caudal y CSS son más estrechas. Por lo tanto más previsible también, el funcionamiento hidrológico de la cuenca.

Al comparar la CSS encontradas en agosto, estas se encuentran dentro del rango mínimo en relación con las encontradas por Rodríguez (1991) y Mayen (2003). En el resto de los meses antes de mayo, se encuentra muy por debajo, en comparación con el periodo pre cosecha. Sin embargo los valores en mayo son muy superiores a los encontrados por el mismo autor en el periodo post cosecha.

Dentro de este periodo las concentraciones variaron entre 7.4 y 52.2 mg/l con un promedio de 14.7 mg/l. El valor promedio es similar, al compáralos con los valores promedios para una plantación de 15 años de edad obtenido por Rodríguez (2003).

4.6 Producción de sedimento en los eventos de tormenta

Este capítulo describe la relación de la CSS, con los caudales de los eventos A, B ocurrido precosecha y el evento C ocurrido post cosecha (figura 5). El análisis se basa en el comportamiento de la CSS, en las fases ascendentes, descendentes y totales de los respectivos hidrogramas. Para el caso se unieron los eventos A y B.

Al analizar los eventos A, B y C, tanto para el total, como en la fase ascendente y descendente. La función ajustada resultó inaplicable, ya que no se ajustó a la distribución de datos. La interpretación hidrológica se base en que existe una notable diferencia en la CSS v/s caudal, por las distinta grado cobertura que presento la cuenca entre los eventos A y B (pre cosecha), con el C (post cosecha).

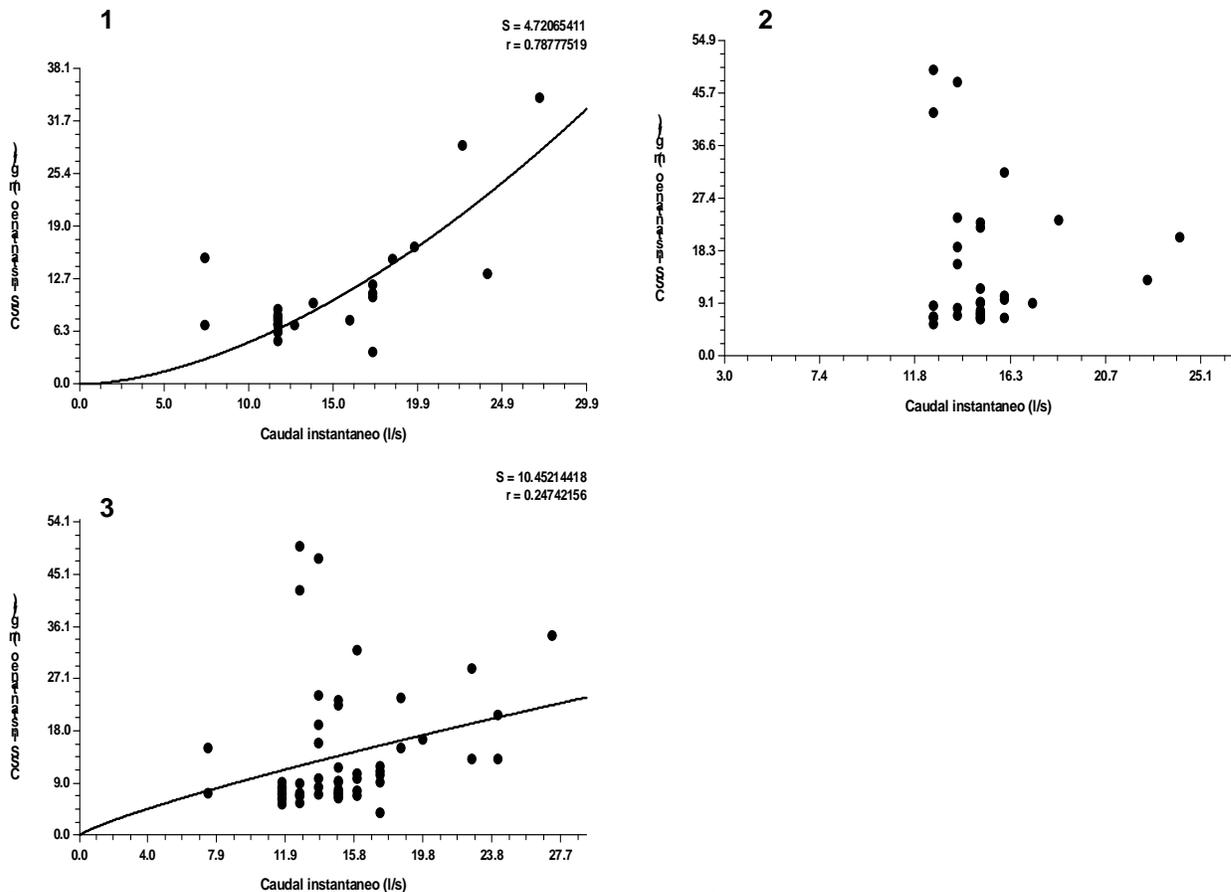


Figura 7. Relaciones CSS (mg/l)/ caudal (l/s) en la condición pre cosecha para los eventos ocurridos en primavera (evento A y B, figura 5). Las subfigura 1,2 y 3 muestran la fase ascendente, descendente y total de los hidrogramas respectivamente.

La figura 7 muestra la dispersión de los valores de CSS/caudal instantáneos, para los eventos estudiados A y B. Al agrupar el total de los datos de estos eventos (subfigura 3), no se observó ninguna relación clara, esto lo refleja el bajo valor de r^2 , además de una alta dispersión con caudales de 11 a 17 l/s.

La relación aumenta notablemente en la fase ascendente del hidrograma (subfigura 1) con un r^2 de 0.78%. Similares tendencias encontraron Rodríguez (1991) e Iroumé (1992) mayores valores de correlación en la fase ascendente, con valores de 0.57 y 0.77 % respectivamente.

En la fase descendente del hidrograma (subfigura 2) baja considerablemente la relación, no pudiendo la función ser ajustada por la distribución de los datos. Esto refleja que cuando cesan las precipitaciones, se reducen los escurrimientos superficiales, por lo que bajan los procesos de desprendimiento y de arrastre de partículas de suelo. Esto hace que caudales altos posean bajas concentraciones de sedimento y por el contrario bajos caudales poseen mayores concentraciones de sedimento. Lorente *et al.* (2000) explica esta relación, al suceder la caída de un talud desestabilizado o al movimiento del sedimento depositado en la red de drenaje. Este

patrón lo asocia habitualmente a cuencas pequeñas, donde leves movimientos de masa de corta duración, tienen grandes repercusiones en la concentración de sedimento.

El análisis de estos eventos indican que los procesos erosivos que se manifiestan en la cuenca cuando esta no esta alterada, tienen estrecha relación con la intensidad del escurrimiento superficial que se genera. Manifestándose un alza en la concentración cuando el caudal aumenta y un proceso de dilución, cuando el caudal esta disminuyendo.

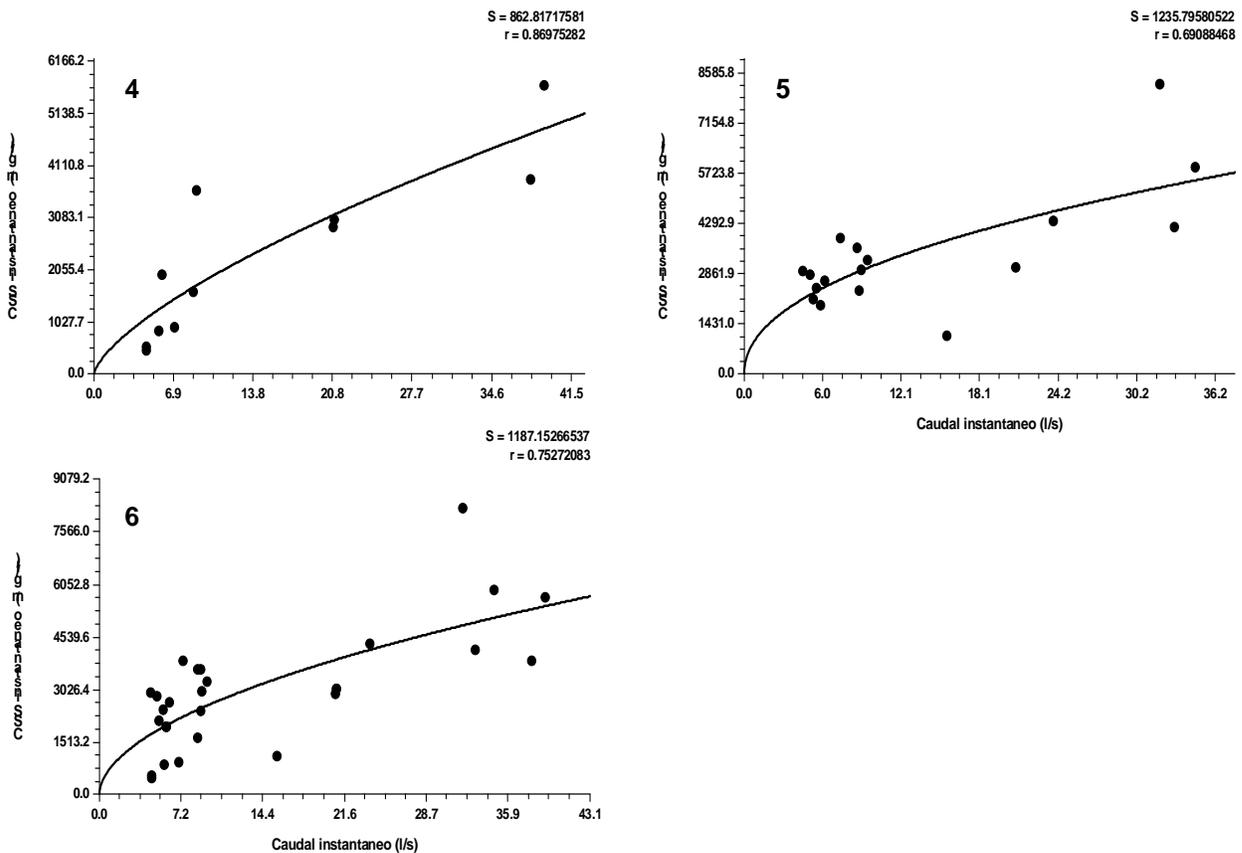


Figura 8. Relaciones CSS (mg/l)/caudal (l/s) en la condición post cosecha para el evento C. Las subfigura 4,5 y 6 muestran la fase ascendente, descendente y total del hidrogramas.

En relación con el evento C, ocurrido post cosecha en general para la fase ascendente, descendente y total, muestra una alta relación CSS/caudal, con valores de r^2 de 86, 69 y 75% respectivamente. Se observa una mayor dispersión de las CSS con caudales entre 7 y 11 l/s y una relación más directa al aumentar el caudal.

La hipótesis de este comportamiento se basa en que al ocurrir precipitaciones de alta intensidad, como fue el evento C y al estar el suelo removido por la actividades de cosecha, la lluvia tienen mayor capacidad de desprender partículas del suelo dentro

de la cuenca y de zonas cercanas al cauce, debido a la ausencia de zona buffer (ver fotografía en anexo 4). Como consecuencia los aumentos en la escorrentía superficial por leves que sean, traen consigo una mayor CSS.

Con respecto a los valores absolutos de los eventos A y B, el valor promedio fue de 13.58 mg/l. Valor similar al promedio de todo el periodo de estudio, los valores extremos variaron entre 3.8 y 49.8 mg/l.

Iroumé (2003) en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes, encontró en general valores más bajos de CSS, si se compara con los obtenidos en este estudio, antes de la alteración. Se explica estas diferencias, por las elevadas tasas de infiltración que presenta la cuenca andina, debido a la textura del suelo. Ya que posee un mayor porcentaje de arena, en comparación con las cuencas de la costa, donde sus suelos son de texturas más francas a arcillosas y por ende las tasas de infiltración son menores.

Para el evento C el valor promedio fue de 3034,8 mg/l y sus valores extremos fueron 461,23 y 8253,8 mg/l.

Es destacable la enorme diferencia en la misma cuenca al analizar eventos pre y post, esta diferencia es producida en gran parte por el efecto de la tala rasa, sumado a esto la alta intensidad del evento.

Oyarzun y Peña (1995) también detectaron para los dos años de estudio, diferencias importantes en la CSS, entre las parcelas con quema de residuos y control, siendo para el primer año de 561 y 59 mg/l, y para el segundo de 400 y 83 mg/l respectivamente.

Otra variable que demuestra el efecto de la tala rasa es que los sedimentos en los eventos A y B presentan un contenido de materia orgánica promedio de 55%, y sus valores extremos varían entre 11.1 y 96.3%, en comparación con el evento C, que presenta un valor promedio de 6.5% y valores extremos de 2.8 y 11.8% de materia orgánica. Esto refleja que los sedimentos erosionados en los eventos A y B, sin duda provienen del suelo de la cuenca, por su alto contenido de materia orgánica, en otras palabras corresponde a flóculos erosionados. En cambio la baja participación de materia orgánica de los sedimentos medidos en el eventos C, dan indicios de que parte de este material corresponde a suelo de la cuenca, pero principalmente, el origen de estos se encontraría en los taludes provenientes de la realización de caminos para la explotación.

Todo lo anterior demuestra el nocivo efecto en la calidad de agua, por el aumento de la CSS que se produce al realizar una tala rasa sin medidas de control. Como lo son la protección de las zonas cercanas a los cauces. No solo por el rol que cumple esta vegetación en el control de los sedimentos que son erosionados del suelo de la cuenca. Sino por el mantenimiento de la morfología y características particulares del lecho del cauce al disminuir los desprendimientos en sus zonas cercanas.

5. CONCLUSIONES

La caracterización de la cuenca en estudio presentó un relieve acentuado, caracterizada por fuertes pendientes. Tiene un alto desarrollo de la vegetación (múltiples estratos). El suelo presentó buenas características, tanto de profundidad como en su estructura.

Durante el periodo de estudio se evidenció una alta variación, en los caudales promedios, según la estación del año que se trate. El caudal fue relativamente constante en el periodo de primavera (agosto a noviembre), hasta hacerse mínimo a fines de abril, con una fuerte alza en mayo. Esta alza fue consecuencia en parte por las altas e intensas precipitaciones y por otro lado al efecto de la tala rasa. Se destaca la alta capacidad del suelo, para almacenar agua especialmente, en periodos con ausencia de precipitaciones. Esto consecuencia de las buenas características del suelo.

Se determinó que durante la primavera y principalmente el verano, (noviembre hasta abril) el tipo de escorrentía más importante es del tipo sub superficial, representado por el caudal base que tuvo un porcentaje promedio de participación de un 93.3 %, en relación con el caudal total. Con valores extremos de 84.6 y 100%.

Se demostró que el contenido de humedad del suelo, determina el tipo de flujo que se produce, para esta condición de bosque. Ya que un evento de igual intensidad, pero en distinta época del año, produce un tipo de escorrentía distinto. Para el verano dominan escurrimientos sub superficiales y para la primavera e invierno, principalmente superficiales. Esto sin duda tiene mucha importancia en la calidad de agua que se exporta.

En relación con la exportación de sedimento, también se observó una variación estacional. El valor promedio para el período de estudio, fue de 17.6 kg/ha/mes, con n valor mínimo de 3.5 kg/ha/mes ocurridos en verano y un valor máximo de 95 kg/ha/mes, ocurrido en invierno; esto antes de la tala rasa. Posterior a la tala rasa se generaron 4975.3 kg/ha en un mes. De esta manera se evidenció el gran impacto de la tala rasa en la producción de sedimentos, bajo un régimen de altas e intensas precipitaciones.

Se obtuvo una buena relación, entre caudal promedio y CSS promedio mensual, con un r^2 de 0,91%. Se observó que en la estación semi seca (primavera y verano) la CSS permanece constante. A pesar de que en este período hay una alta variación de los caudales promedio, siendo 2,1 l/s el mínimo y 6.8 l/s el máximo. Esto hace presumir, que la fuente de sedimento, está próximas al cauce. Ya que la proporción de escorrentía superficial para este período, es muy baja. Sin embargo en la estación húmeda (otoño e invierno) los sedimentos erosionados, provienen de zonas más altas de la cuenca, como consecuencia del aumento de la escorrentía superficial.

Se destaca el rol regulador de la vegetación, en el control de caudales máximos durante eventos de elevada intensidad. Esto se manifiesta, al analizar los montos de

escorrentía producido por eventos de tormenta de un moderado a alto periodo de retorno, 101.6 y 167.4 mm producidos en agosto y mayo respectivamente. Los montos de escorrentía generados fueron notablemente distintos, ya que para el evento de mayo la cuenca estaba intervenida en aproximadamente un 50%.

Se evidenció el rol protector de la zona buffer, principalmente por la diferencia del contenido de materia orgánica en los sedimentos exportados en los eventos pre cosecha, que poseían en promedio un 55% de materia orgánica, en comparación con los exportados en el evento post cosecha que presentaron un 6.5% contenido orgánico promedio.

Para evaluar el comportamiento de una cuenca en la generación de caudales y producción de sedimentos ante una intervención silvícola, se recomienda prolongar el período de estudio de manera de poder analizar de mejor manera la dinámica de ésta.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Beschta, R. 1996. Suspended sediment and bedload. Chapter 7. *In*. Hauer, R; G. Lamberti (eds). *Methods in Stream Ecology*. California, Academic Press. pp 123 - 143
- Bruijnzeel, S. 1997. Hidrología en Plantaciones Forestales en los Trópicos. Departamento de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Colombia. 571 p.
- Calder, I. R; 1992. The hidrology impact of land-use change. In proceedings of the Conference on priorities for water resources Allocation and Management , 91-101 p.
- Conesa, C.; A. Rogel. 2001. Energía y erosión pluvial en la región de Murcia, correlación con el índice de agresividad anual de Fournier Central. *Rev C&g.*, 15 (1-2), 11-24
- Chang, M.; S.P., Watters. 1984. Forest and other factors associated with streamflow in east Texas. *American Water Resources Association* 20 (5): 713 – 719
- Fahey, B. 1994. The effects of plantation forestry on water yield in New Zealand. *New Zealand Forestry* 18 – 23
- FAO. 2003. Transporte de sedimentos. INTERNET:<http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s07htm#estimación%20de%20la%20carga%20en%20suspensión.html> (Mayo 2, 2004).
- Fuenzalida, H. 1971. *Clima: Geografía Económica de Chile*. Texto refundido. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 99 - 152 p.
- Gayoso, J.; A., Iroumé. 1995. Impacto de las plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque* 16 (2): 3 - 12
- Honorato, R. 1993. *Manual de Edafología*. Chile, Ed. Universitaria. 196 p.
- Huber, A ; Iroumé, A. 2001. Variability of the annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of hydrology*. 248: 78-92
- Huber, A.; C., Oyarzún. 1984. Factores reguladores de la intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque* 6 (2): 74 - 82
- Huber, A.; Lopez, D. 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por la tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don), Valdivia, Chile. *Bosque* 14 (2): 11-18

- Hudson, N.W. (1963): Raindrop size distribution in high intensity storms. *Rhodesian Journal of Agricultural Research*, 1, pp. 6-11
- Iroumé, A. 1990. Assesment of runoff and suspended sediment yield in a partially forested catchment in southern Chile. *Water Resources Research* 26 (11): 2637 - 2642
- Iroumé, A. 1992. Precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca cercana a Valdivia. *Bosque* 13(2) 15-23
- Iroumé, A. 2003. Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque* 24 (1): 125 - 135
- Iroumé, A.; J., Gayoso; L., Infante. 1989. Erosión Hídrica y alteración del sitio en cosecha a tala rasa. *Revue D' Ecologie Et De Biologie Du Sol*. 26 (2): 171 - 180
- Iroumé, A.; Huber, A. 2000. Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Reguion, Chile. *Bosque* 21(1): 45-56
- Jones, J. A.; G. E., Grant. 1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research* 32 (4): 959 - 974
- Lee, R. 1980. *Forest Hydrology*. New York, E.E.U.U. Columbia University Press. 349 p.
- León, F. 1996. Caracterización y balance hídrico de la cuenca experimental "Los Pinos" de Valdivia, X Región. Tesis Ing. For. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 204 p.
- López, C.; C. Blanco. 1976. *Hidrología Forestal*. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. v.1, 387 p.
- Lorente, A ; M. Bono; C. Beguería, S; Arañes,G. Ruiz. 2000. La exportación de sedimento en suspensión en una cuenca de campos abandonados, Pirineo Central. *Rev C&G.*, 14 (1-2), 21-34
- Mayen, J. 2003. Respuesta del cambio de cobertura vegetal, en los caudales estacionales, caudales máximos y en transporte de sedimentos, en cuencas experimentales de la Décima Región. Tesis Mag Cs.for. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 180p.
- Martínez de Azagra, A.; J. Navarro. 1996. *Hidrología Forestal: El Ciclo Hidrológico*. 3 ed. Valladolid, Secretariado de Publicaciones, Universidad de Valladolid. 286 p.

- MIDEPLAN. 1998. Cuencas hidrográficas en Chile: Diagnósticos y Proyectos. Santiago. Andros. 207 p.
- Morgan, R.P.C. 1980: Soil erosion and conservation in Britain, *Processes in Phys.Geogr.* 4, pp. 24-47
- Morgan, R.P.C. 1983: The non-independence of rainfall and soil erodibility, *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, pp. 323-338.
- Oyarzún, C. 1994. Características físicas y químicas de los sedimentos erosionados desde suelos con plantaciones forestales. *Bosque* 15 (2): 31 – 38
- Oyarzun, C. ; Peña, L. 1995. Soil erosion and overland flow in forested areas with pine plantations at coastal mountain range, central Chile. *Hydrological processes*. 9: 111-118
- Rodríguez, D . 1991. Escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca de la Décima Región. Tesis Ing. For. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 70 p.
- Rodríguez, Y. 2003. Generación de caudales y producción de sedimentos en cuencas en la Cordillera de la Costa, IX Región. Tesis Ing. For. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 44 p.
- Rothwell, R. 1978. Watershed management guidelines for logging and road construction in Alberta. Can. For. Serv., North For. Res. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR –X-208, 43 p.
- Schlatter, J. E.; R. Grez; V. Gerding. 2003. Manual Para el Reconocimiento de Suelos. 3 Ed. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 114p.
- UNESCO. 2004. Erosión y transporte de sedimentos. INTERNET:<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/obrashidraul/Cap3.html> (Mayo 2, 2004)
- Waters, T. 1995. Sediment in streams; sources, biological effects, and control. North Carolina, American Fisheries Society Monograph 7. 850 p.

ANEXOS

Anexo 1
Abstract and keywors

Variation in the runoff and sediment production with emphasis in storm event, in a small watershed in Provincia of Valdivia, Décima Región.

For the period of august of 2004 and june of 2005, the quantity of water was quantified that it exported a watershed of 17.8 ha, located in the coast near of Valdivia city, covered with *Pinus radiata* plantation of 28 year-old radiata. This watershed at middle of may was clear-cutting in 50% of its surface.

The quantified precipitation was 2535.1 mm and the quantity was exported from equivalent water to 1401 mm. A strong variation it was observed in the distribution of the precipitations, characterized by a rainy winter and a dry summer. The watershed presented a good capacity to store water, manifesting a flow average of 9.06 l/s, with values minima of 2.1 l/s happened in april and a maximum of 26.7 l/s in the month of june.

It was determined that the processes of escorrentía generation are regulated indirectly by the content of humidity of the soil. For the period of spring-summer, the type of more important of runoff is the ground water, represented by the bases flow. During the winter the flow corresponded mainly to overland flow.

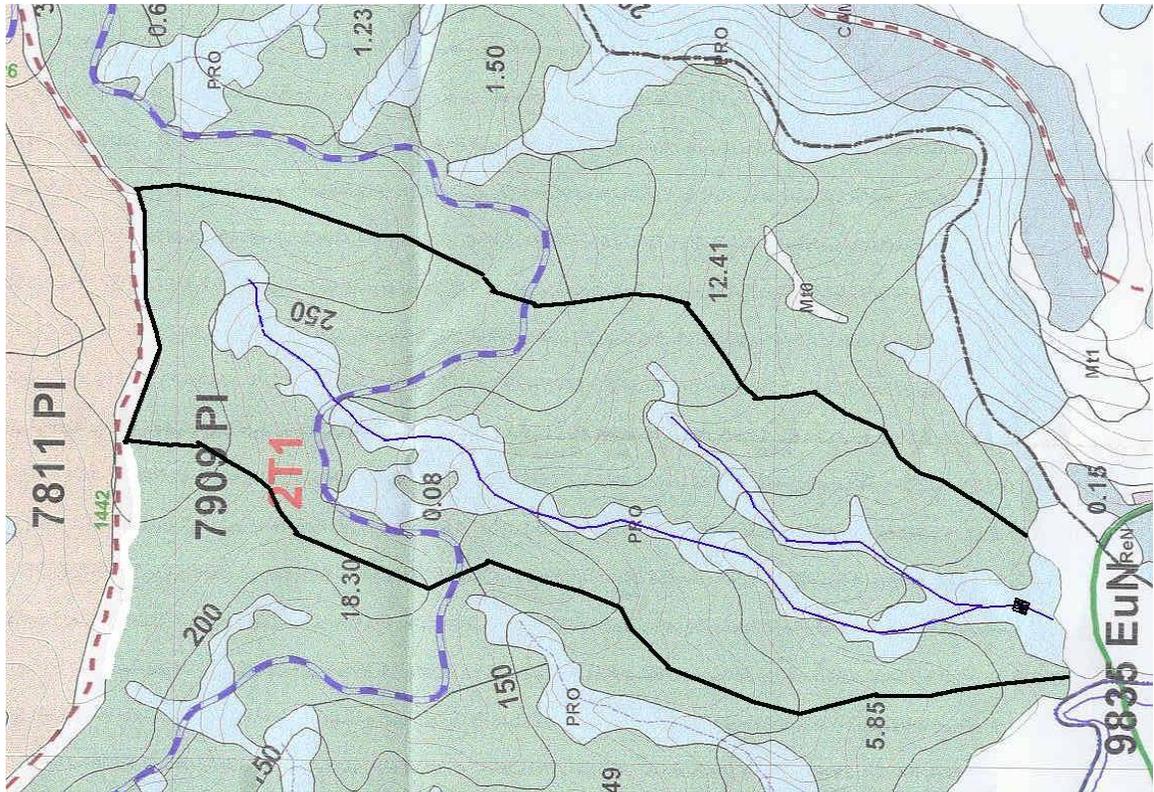
The sediment losses followed a similar seasonal variation that that of the runoff. In summer they happened the minimum values, in comparison with those of winter. The quantity of soil losses exported average was of 17.6 kg/ha/month, with values minimum of 3.5 and maximum of 95 kg/ha/month, this before to the harvested. Later to this 4975.3 kg/ha/month was exported. The CSS during the storm event pre harvests was of 13.58 mg/l, The extreme values varied between 3.8 and 49.8 mg/l. For the storm event post crop, the value average was of 3034.8 mg/l and its extreme values were 461.23 and 8253.8 mg/l.

The relationship CSS / flow, for the storm pre harvests it was low (r^2 of 20%) however this relationship was better when analyzing the upward section of the hidrograma, with values 84.9%. The storm event post harvested showed good relationship values, for the total, the upward and descending phase, with values of 77, 86 and 78% respectively. This demonstrates that the soil losses are dominated by the quantity of the overland flow that is generated in the watershed, These processes they are accentuated with the clear-cutting.

Keywords: Runnof, sediment concentration, analysis of storms event, clear-cutting.

Anexo 2

Plano y fotografía de la cuenca experimental



Anexo 3
Fórmulas de parámetros y representaciones geomorfológicas

Índice de compacidad

Una vez conocida la información de superficie y perímetro de ambas cuencas, se puede obtener el índice de Compacidad o de Gravelius, el cual indica la forma aproximada que presentan ambas cuencas en estudio. La fórmula a aplicar para la obtención de este índice, es la descrita por Martínez de Azagra y Navarro (1996):

$$Ic = 0,28 * \left(\frac{P}{\sqrt{S}} \right)$$

K_G : Índice de Compacidad.

P : Perímetro de la cuenca (m)

S : Superficie de la cuenca (m²)

Por lo tanto, cuando:

$1,00 \leq K_G < 1,25$; cuencas redondas

$1,25 \leq K_G < 1,50$; cuencas ovaladas

$1,50 \leq K_G < 1,75$; cuencas alargadas

Rectángulo Equivalente

$$L = \left[\frac{(Ic * \sqrt{S})}{1,12} \right] * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Ic} \right)^2} \right]$$

$$l = \left[\frac{(Ic * \sqrt{S})}{1,12} \right] * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Ic} \right)^2} \right]$$

l = Lado menor rectángulo (km)

L = Lado mayor rectángulo (km)

$l * L = S$ (Superficie de la cuenca)

$2 * (l + L) = P$ (Perímetro de la cuenca)

Índice de Pendientes o Pendiente Media de la Cuenca

$$I_p = \frac{(D * L)}{S}$$

D : Equidistancia entre curvas de nivel (km)

L : Longitud total de las curvas de nivel en la cuenca (km)

Altitud Media

$$H_m = \sum \frac{S_i}{S} * \left[\frac{(n_i + n_{i-1})}{2} \right]$$

S_i : Superficie entre curvas de nivel

n_i, n_{i-1} : Curvas de nivel

Coefficiente Orográfico

$$C_o = \frac{H^2}{S} \quad \left(\frac{m}{km^2} \right)$$

$$H = H_m - C_p$$

C_p = Cota punto control

$C_o \leq 6$, Cuenca de relieve poco accidentado

$C_o > 6$, Cuenca de relieve accidentado

Densidad de Drenajes

$$D_d \left(\frac{km}{km^2} \right) = \text{(Longitud total de cauces en la cuenca / } S \text{)}$$

Coefficiente de Torrencialidad

$$C_t \left(\frac{1}{km^2} \right) = \text{(Nº de cursos de orden 1) / } S$$

Tiempo de concentración

El resultado entregado corresponde al promedio obtenido entre las fórmulas propuestas por Témez y la propuesta por Bruce & Clark:

Fórmula de Témez:

$$T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76}$$

T_c : Tiempo de concentración, en horas.

L : Longitud del cauce principal, en kilómetros.

$$J = \frac{(H_{max} - H_{min})}{(1000 * L)}$$

J : Pendiente media del cauce principal.

Fórmula de Bruce y Clark:

$$T_c = 0,61 * \left(\frac{n * L}{\sqrt{J}} \right)^{0,467}$$

T_c : Tiempo de concentración, en horas.

n : Coeficiente de rugosidad según tabla anexa.

L : Longitud del cauce principal, en kilómetros.

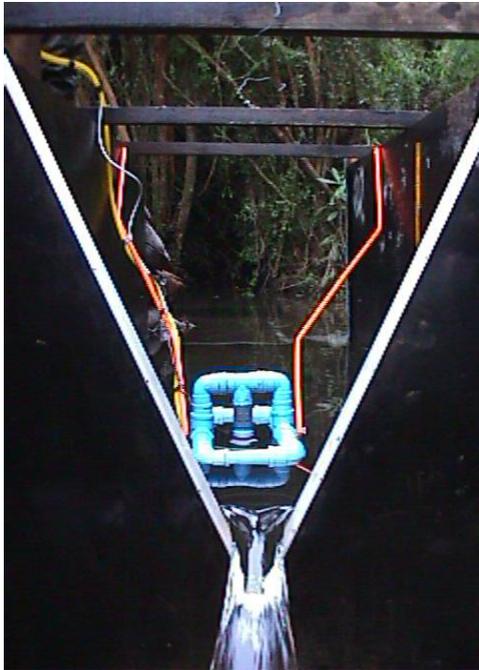
$$J = \frac{(H_{max} - H_{min})}{(1000 * L)}$$

J : Pendiente media del cauce principal.

Coeficientes de rugosidad para el calculo del tiempo de concentración según fórmula Bruce y Clark.

Tipo de Superficie	Valor de n
Impermeable	0,02
Suelos sin cubierta	0,1
Pastizales pobres; cultivos	0,2
Pastizales	0,4
Bosques deciduos	0,6
Bosques de coníferas, deciduos, con materia orgánica profunda	0,8

Anexo 4
Fotografías del efecto en la calidad de agua ante y después de la tala rasa



Comparación en la calidad del agua periodo pre cosecha (agosto 2004), nótese el aumento de la CSS , fotografía de evento C (30 junio 2005)



Tala rasa en cuenca de estudio, se observa que no se respeto la zona de Protección.

Anexo 5
Memoria de cálculo de los sedimentos en suspensión para los eventos

Dia	hora	Q (l/s)	mg/l	Organico (mg/l)	Inorganico (mg/l)
21/10/2004	0:06	11.7	6.2	5.7	0.5
21/10/2004	1:06	11.7	5.3	3.5	1.8
21/10/2004	2:06	11.7	6.4	6.2	0.2
21/10/2004	3:06	11.7	7.3	4.6	2.7
21/10/2004	4:06	11.7	7.1	4.3	2.9
21/10/2004	5:06	11.7	9.1	5.4	3.7
21/10/2004	6:06	11.7	7.7	5.4	2.3
21/10/2004	7:06	11.7	8.1	4.8	3.3
21/10/2004	8:06	11.7	8.4	7.7	0.7
21/10/2004	9:06	12.7	7.2	4.6	2.6
21/10/2004	10:06	13.8	9.8	4.8	5.0
21/10/2004	11:06	17.3	11.0	8.6	2.4
21/10/2004	12:06	17.3	12.0	2.6	9.3
21/10/2004	13:06	17.3	3.9	2.5	1.4
21/10/2004	14:06	17.3	10.5	5.5	5.0
21/10/2004	15:06	16.0	7.8	4.7	3.1
21/10/2004	16:06	19.8	16.6	7.3	9.3
21/10/2004	17:06	24.1	13.3	7.3	6.1
21/10/2004	18:06	18.5	23.7	12.6	11.1
21/10/2004	19:06	16.0	32.0	16.2	15.8
21/10/2004	20:06	14.9	22.5	11.7	10.8
21/10/2004	21:06	14.9	23.4	11.7	11.7
21/10/2004	22:06	13.8	19.1	11.4	7.8
21/10/2004	23:06	13.8	16.0	8.3	7.7
22/10/2004	0:06	13.8	24.1	12.2	11.8
22/10/2004	1:06	13.8	47.8	24.8	22.9
22/10/2004	2:06	13.8	8.4	4.6	3.8
22/10/2004	3:06	13.8	7.1	4.2	2.9
22/10/2004	4:06	12.7	6.9	4.4	2.5
22/10/2004	5:06	12.7	5.7	3.4	2.3
22/10/2004	6:06	12.7	6.8	4.0	2.8
22/10/2004	7:06	12.7	8.9	4.9	4.0
22/10/2004	8:06	12.7	49.9	24.0	25.8
22/10/2004	9:06	12.7	42.4	19.6	22.9
31/10/2004	9:20	24.1	20.8	10.1	10.7
31/10/2004	10:20	22.6	13.3	6.3	6.9
31/10/2004	11:20	17.3	9.2	4.4	4.8
31/10/2004	12:20	16.0	10.6	5.3	5.3
31/10/2004	13:20	16.0	9.8	6.4	3.4
31/10/2004	14:20	16.0	6.8	3.4	3.4
31/10/2004	15:20	14.9	6.4	3.6	2.8
31/10/2004	16:20	14.9	11.8	5.8	6.0
31/10/2004	17:20	14.9	9.5	4.4	5.1
31/10/2004	18:20	14.9	7.3	3.9	3.5
31/10/2004	19:20	14.9	6.6	3.8	2.8
31/10/2004	20:20	14.9	9.2	5.0	4.2
31/10/2004	21:20	14.9	8.0	4.0	4.0
31/10/2004	22:20	14.9	7.6	4.4	3.2
31/10/2004	23:20	14.9	7.0	4.8	2.2
1/11/2004	8:06	18.5	0.0	8.3	6.8
1/11/2004	9:06	18.5	15.1	15.3	13.5

Dia	hora	Q (l/s)	mg/l	Organico (mg/l)	Inorganico (mg/l)
1/11/2004	10:06	22.6	28.8	20.7	13.7
1/11/2004	11:06	27.2	34.4	8.0	7.2
10/29/2004	19:45	7.4	15.2	6.4	0.8
10/30/2004	10:45	7.4	7.2	22.6	520.3
30/06/2005	2:00	4.6	543.9	12.7	448.2
30/06/2005	4:00	4.6	461.2	82.9	765.4
30/06/2005	7:30	5.7	858.4	72.2	858.4
30/06/2005	8:30	7.0	930.6	76.1	1552.6
30/06/2005	9:30	8.7	1632.6	265.8	2645.6
30/06/2005	10:30	20.8	2911.4	237.1	3598.3
30/06/2005	11:30	38.0	3852.1	458.2	5186.9
30/06/2005	12:30	39.2	5689.5	974.9	7124.4
30/06/2005	13:30	32.0	8253.8	455.0	5394.2
30/06/2005	14:30	34.7	5891.1	174.5	3998.2
30/06/2005	15:30	33.1	4172.7	316.2	4010.9
30/06/2005	16:30	23.8	4354.1	256.6	2842.4
30/06/2005	18:00	15.6	3099.0	184.7	3065.3
30/06/2005	19:30	9.5	3261.9	249.7	2565.5
30/06/2005	20:30	5.1	2842.1	111.4	2277.3
30/06/2005	21:30	8.9	2394.3	124.4	2325.5
30/06/2005	22:30	5.6	2456.9	54.1	1907.5
1/7/2005	0:00	5.9	1963.2	258.2	3333.4
1/7/2005	1:00	8.7	3613.2	181.1	2843.0
1/7/2005	2:00	20.9	3036.4	81.6	2877.3
1/7/2005	3:30	9.0	2961.2	372.1	3448.3
1/7/2005	5:00	7.4	3865.3	133.4	2513.2
1/7/2005	6:30	6.2	2654.1	157.4	1964.3
1/7/2005	7:30	5.3	2135.4	140.6	1886.1