



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

**Análisis de caudales máximos en cuencas experimentales
para distintas condiciones de cobertura arbórea, Décima
Región, Chile**

Patrocinante: Sr. Andrés Iroumé A.

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

CLAUDIA IVONNE CASTILLO VEGA

VALDIVIA
2005

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Andrés Iroumé A.	_6,0_
Informante:	Sr. Anton Huber J.	_5,9_
Informante:	Sr. Jorge Gayoso A.	_5,9_

El Patrocinante acredita que el 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. Andrés Iroumé A.

Dedicado

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Andrés Iroumé por la oportunidad que me brindó de conocer más de cerca la Hidrología a través de esta investigación y a los profesores Anton Huber y Jorge Gayoso por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Una mención especial es para Hardín Palacios que estuvo siempre dispuesto a ayudarme, socorrerme y soportarme cuando las dudas me invadían, gracias por explicarme una y otra vez.

Gracias a mis queridos papás que me brindaron su apoyo siempre y a mis queridos hermanitos Mauricio y Pamelín. Y por supuesto a todas las personas que conocí en la universidad que me brindaron su apoyo cuando más lo necesité, gracias por prestarme oídos y por sus palabras de aliento.

Pero mi vida en Valdivia fue más que la universidad y la universidad abarcó mucho más que mi tesis, gracias a todos mis amigos y amigas, a todos mis hermanitos Testigos de Jehová que me recibieron con los brazos abiertos y me dieron su cariño en estos años y a Jah muchas gracias por estar siempre conmigo.

INDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Cuenca hidrográfica, su definición y estudio	3
2.2 Caudal, componente del ciclo hidrológico	3
2.3 Efectos de la actividad forestal sobre el caudal	4
3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	6
3.1 Área de estudio	6
3.1.1 Antecedentes geográficos, clima y suelo	6
3.1.2 Descripción vegetacional	7
3.2 Registro precipitación, determinación caudal y período de estudio	8
3.3 Eventos de precipitación	9
3.3.1 Clasificación precipitaciones	9
3.3.2 Eventos individuales	10
3.4 Diferencias caudales máximos	10
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
4.1 Categorización precipitaciones	12
4.2 Análisis de los caudales en la cuenca La Reina	12
4.2.1 Caudales máximos en La Reina	12
4.2.2 Eventos individuales en La Reina	15
4.3 Análisis de los caudales en las cuencas Los Ulmos	17
4.3.1 Categorización precipitaciones anuales	17
4.3.2 Caudales máximos unitarios en Los Ulmos	17
4.3.3 Eventos individuales en Los Ulmos	20
5. CONCLUSIONES	24
6. BIBLIOGRAFIA	25
ANEXOS	
1 Abstracts and Keywords	
2 Tablas de Rodal Cuenca La Reina	

- 3 Tablas de Rodal Cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2
- 4 R^2 Cuenca La Reina
- 5 R^2 Cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2
- 6 Tendencia caudales máximos cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2
- 7 Tendencia caudales máximos cuencas La Reina y Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2
- 8 Prueba Mann- Whitney- Cuenca La Reina - Eventos pequeños, medios y grandes año 2005
- 9 Prueba Mann- Whitney- Cuenca Los Ulmos 1 y 2 E. pequeños años 2000- 2005
- 10 Prueba Mann- Whitney- Cuenca Los Ulmos 1 y 2 E. medios años 2000- 2005
- 11 Prueba Mann- Whitney- Cuenca Los Ulmos 1 y 2 E. grandes años 2000- 2005

RESUMEN EJECUTIVO

Esta investigación trató de la comparación de los caudales máximos en cuencas con diferentes condiciones de cobertura arbórea ubicadas en la Décima Región, Chile.

Para ello se analizaron dos situaciones. La primera corresponde a la cuenca La Reina, donde luego de tres años de monitoreo (1997-1999) se cosechó a tala rasa la plantación de *Pinus radiata* existente, la que posteriormente (año 2000) se reemplazó por una plantación de *Eucalyptus nitens*. La segunda corresponde a dos microcuencas, denominadas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2, cubiertas por plantaciones de *Eucalyptus nitens* establecidas los años 1997 y 2000 respectivamente, y por lo tanto tienen 3 años de diferencia en el desarrollo.

Para la cuenca La Reina el período de estudio abarcó de 1997 a 2005, y del 2000 al 2005 para las cuencas Los Ulmos. Para estudiar el efecto de la cubierta vegetal en los caudales máximos, se agruparon las tormentas de lluvia en tres categorías: pequeñas (5-10 mm), medias (10-50 mm) y grandes (mayores a 50 mm).

Luego de la cosecha a tala rasa de la plantación de la cuenca La Reina, se detectaron incrementos en los caudales máximos para todas las categorías de precipitación, lo que indica que la remoción de la cubierta vegetal tiene un efecto significativo en los caudales, incluso en los eventos extremos. El aumento fue apreciable tanto al comparar los caudales medios de la condición de pre-cosecha (por categoría de evento) con la media de los caudales del periodo de post-cosecha como con los caudales máximos de cada uno de los años de este último periodo. La mayor diferencia porcentual entre los períodos de pre y post-cosecha ocurrió en los caudales máximos generados por eventos de pequeña magnitud. Luego de cinco años de la cosecha a tala rasa, que corresponde al período de crecimiento de la nueva plantación, los valores de los caudales no muestran un aumento importante inicial seguido de una gradual disminución tendiendo hacia los niveles de caudales de la condición de pre-cosecha.

Las medianas de los caudales máximos unitarios en la cuenca Los Ulmos 2 superan a los de la cuenca Los Ulmos 1 para la categoría de eventos pequeños en los años 2001 al 2005, siendo estadísticamente significativas las diferencias porcentuales entre cuencas en los años 2001 y 2003. La cuenca Los Ulmos 2 posee una plantación con tres años de menor desarrollo que la de Los Ulmos 1.

En ambas cuencas se confirmó que la mayor influencia de la cobertura arbórea sobre los caudales máximos, fue para eventos de pequeña magnitud. Esto ocurrió tanto para las condiciones de la cuenca La Reina como para las estudiadas en las cuencas Los Ulmos.

Palabras clave: cuencas experimentales, caudal máximo, cobertura arbórea.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un bosque así como las operaciones forestales provocan alteraciones en el balance hídrico, ya que se modifican los niveles de intercepción, evapotranspiración y escorrentía (Gayoso e Iroumé, 1995). Al modificarse los procesos de generación de escorrentías, también son afectados los caudales a escala anual, estacional y máxima.

Las cuencas experimentales se emplean para estudiar la magnitud de los cambios en los caudales en general, y en los caudales máximos en particular, cuando se han realizado prácticas silviculturales.

A la vegetación que crece al interior de la cuenca, se le ha reconocido una función de protección. Como lo manifiesta López y Blanco (1976) el papel regulador de la cubierta vegetal en la cuenca sería preponderante en las épocas de máxima intensidad de lluvia, pues reduciría el exceso de escorrentía que produciría crecidas e inundaciones. Sin embargo, nuevas investigaciones plantean que la extracción de la cobertura arbórea de la cuenca puede alterar los caudales máximos producidos por precipitaciones de pequeña magnitud, pero en una escala de precipitaciones extremas o de períodos de retorno mayores, la presencia o ausencia de la vegetación forestal puede tener una menor influencia en el caudal máximo resultante (Zimmer, 1998 y Beschta *et al.* 2000).

Este Trabajo de Titulación tuvo como objetivo general analizar el efecto que generan diferentes condiciones coberturas arbóreas sobre los caudales máximos, en tres microcuencas de la Décima Región.

Para ello se analizaron dos situaciones. La primera corresponde a una cuenca donde luego de un período de tres años de monitoreo se cosechó a tala rasa la plantación de *Pinus radiata* existente, la que posteriormente se reemplazó por una plantación de *Eucalyptus nitens*. La segunda corresponde a dos microcuencas cubiertas por plantaciones de *Eucalyptus nitens* de diferente edad.

Los análisis del efecto de la cubierta vegetal en los caudales máximos se realizaron separando las tormentas de lluvia en tres categorías: pequeñas, medias y grandes.

Los objetivos específicos fueron:

- Extender y complementar el análisis de los caudales máximos en una microcuenca, comparando entre los períodos de pre y post cosecha.

- Comparar los caudales máximos en dos microcuencas vecinas cuya cubierta vegetal corresponde a plantaciones con tres años de diferencia en su establecimiento.
- Analizar para estas dos situaciones, los caudales máximos generados para eventos de precipitación pequeños, medios y grandes, a escala anual y para eventos individuales.*

* Trabajo de Titulación enmarcado en el proyecto “Políticas para el Control Integrado de Cuencas Forestadas ante Eventos Extremos”, tendiente a la gestión integrada de los recursos bosque y agua ante eventos extremos de lluvia y deshielos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Cuenca hidrográfica, su definición y estudio

En los estudios hidrológicos, la unidad espacial más utilizada es la cuenca hidrográfica (Davie, 2003). Ésta se define como el área geográfica que contribuye al flujo del agua de una corriente o río (Bonan, 2002). Es además la unidad natural para organizar adecuadamente las actividades de manejo y controlar los efectos sobre el ambiente (Folliot, 1997).

Se requieren cuencas uniformes para evaluar los efectos de la aplicación de prácticas de manejo. Por ello se han utilizado extensamente los estudios de cuencas pareadas, para determinar el posible impacto del cambio de uso de suelo en la producción de agua. Después de un periodo de calibración donde ambas cuencas son monitoreadas, una de ellas es sometida al tratamiento y la otra permanece como control, así el cambio en la producción de agua se puede entonces atribuir a los cambios en la cubierta vegetal (Blest *et al.*, 2003).

2.2 Caudal, componente del ciclo hidrológico

En una cuenca, el ciclo hidrológico puede ser descrito en términos de entradas y salidas. En una región húmeda, asumiendo entradas sólo por precipitación, el balance del agua según Manning (1997) es:

$$EVPT = PP - ES - \Delta A \quad (1)$$

donde la evapotranspiración (*EVPT*) es igual a la precipitación (*PP*), menos la escorrentía (*ES*) y el cambio en el almacenamiento de agua ΔA de la cuenca.

La escorrentía incluye el movimiento del agua hacia un curso de agua, después de alcanzar la superficie de la tierra como precipitación. Una vez que el agua alcanza un cauce, el proceso es denominado "caudal". Este es el volumen de agua por unidad de tiempo (m^3/s) y un registro continuo del caudal se conoce como hidrograma (Davie, 2003).

En un hidrograma se distinguen la escorrentía directa y el flujo base. La escorrentía directa es aquella parte de precipitación que se incorpora rápidamente a un cauce durante o después de una lluvia, o en los periodos de derretimiento de las nieves, mientras que el flujo base queda condicionado principalmente al aporte de agua subterránea, por lo tanto, es la escorrentía que se mantiene durante el período sin lluvia (Espíldora *et al.*, 1975; Manning, 1997; Davie, 2003).

La forma de un hidrograma es influenciada por características del evento y muchos diferentes factores dentro de la cuenca. Las mayores influencias son ejercidas por el tamaño de la cuenca, pero otros factores incluyen el ángulo de pendiente, el tipo de

suelo, el tipo de vegetación y el porcentaje de cobertura, entre otros (Miller, 1977; Davie, 2003).

2.3 Efectos de la actividad forestal sobre el caudal

En general, las actividades forestales producen efectos en los componentes del ecosistema: suelo, agua, biodiversidad y paisaje (Gayoso *et al.*, 2000).

Son pocos los aspectos de la silvicultura moderna que producen tanto debate público como la corta a tala rasa (Keenan y Kimmins, 1993). Burton (2000) expresa que con este método, se pretende mantener la cotaneidad de la plantación anterior y hacer más fácil su manejo, pero la deforestación produce un aumento de los caudales medios, existiendo una alta asociación entre la cobertura de la vegetación y los caudales, aunque los efectos de ésta disminuyen con el aumento del tamaño de la precipitación (Chang y Watters, 1984).

La magnitud de aumento del caudal máximo, durante una tormenta post-cosecha depende de la extensión de la vegetación removida, responde a la pérdida de dosel, al aumento de la escorrentía superficial y a la compactación y alteración del suelo.

El estudio del escurrimiento superficial tiene el mayor interés cuando se centra en las épocas de máxima intensidad de lluvia, en las que un exceso de escorrentía produce crecidas, inundaciones y catástrofes. En este caso, el papel regulador de la cubierta vegetal de la cuenca sería preponderante (López y Blanco, 1976), aún cuando Miller (1977) expresa que, en general, se han exagerado los indudables beneficios del efecto de los bosques sobre los caudales de inundación.

Fahey (1994) y Fahey y Jackson (1997) realizaron estudios en el área de Big Bush South Island (Nueva Zelanda), comparando los caudales máximos de una cuenca control con los de una cuenca cosechada, para tres clases de tamaño de tormentas. Las diferencias en los caudales máximos fueron significativas entre la cuenca no intervenida respecto de la cosechada para las tres categorías de eventos de precipitación. Los caudales máximos aumentaron hasta un 50% en el período post-cosecha en la cuenca intervenida.

Jones y Grant (1996) y Jones (2000), midieron el comportamiento del caudal por más de 30 años en cuencas pequeñas (60 –100 km²) y por más de 50 años en cuencas grandes (sobre 600 km²), en el Oeste del estado de Oregon (USA). Para comparar las respuestas generadas por una gama de magnitudes de tormentas, se definieron cuatro categorías de eventos de precipitación. La categoría más pequeña incluía eventos de precipitación con períodos de retorno de menos de 0,125 años, mientras que la categoría más grande incluía períodos de retorno desde 0,4 a 100 años.

Los resultados de esta investigación demostraron que los caudales máximos luego de la cosecha, aumentaron en más de un 50% en las cuencas pequeñas y un 100% en las cuencas grandes para todas las categorías de eventos de precipitación,

atribuyendo ésto a la redistribución de la lluvia (por la menor intercepción) y mayor compactación del suelo.

La principal crítica realizada a la investigación de Jones y Grant (1998) es al diseño de clases arbitrarias para los acontecimientos de precipitación y el que no se considerara la distribución de frecuencias sesgada de flujos máximos, siendo agrupados eventos de precipitación con un período de retorno de 0,4 años junto a eventos de precipitación con período de retorno de 100 años.

Thomas y Megahan (1998) re-analizaron los datos de Jones y Grant (1996) y concluyeron que existía una clara evidencia de cambios en los caudales máximos en cuencas pareadas de pequeña escala (60 –100 km²), pero la evidencia era poco concluyente para las cuencas más grandes (sobre 600 km²).

Un nuevo análisis llevado a cabo por Beschta *et al.* (2000) al estudio de Jones y Grant (1996), muestra que los aumentos en los caudales máximos no son evidentes al año siguiente de la cosecha para tormentas con períodos de retorno mayores de cinco años. La investigación de Beschta *et al.* (2000) concuerda con los resultados de Zimmer (1998) quien concluye que no se detectan aumentos en el caudal máximo para las precipitaciones mayores, después de la cosecha realizada.

La controversia respecto a los caudales máximos resultantes después de modificar la cobertura arbórea, se presenta para la respuesta dada a diferentes tamaños de tormentas. La mayoría de los estudios están de acuerdo con que el caudal máximo aumenta luego de la cosecha del bosque, pero existen diversas conclusiones respecto a la influencia de la cubierta del bosque en los caudales máximos generados por tormentas pequeñas comparados con los caudales máximos de tormentas grandes.

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Área de estudio

El área de estudio está conformada por tres microcuencas experimentales, denominadas La Reina, Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2, las que se ubican en la Décima Región. La primera en la Provincia de Osorno y las restantes en la Provincia de Valdivia.

Dentro de los predios de la Hacienda La Trinidad propiedad de la Sociedad Agrícola y Forestal Degenfeld Ltda., se sitúa la cuenca La Reina, 60 km al noroeste de la ciudad de Osorno (Sáez, 1999).

En el predio Los Ulmos, propiedad de la Universidad Austral de Chile, se encuentran las cuencas que llevan este nombre, a 40 km al sur de la ciudad de Valdivia, en la comuna de Paillaco (Schulz, 2000).

La localización geográfica a nivel provincial y nacional de las tres microcuencas incorporadas a la investigación, se da a conocer en la Figura 1.

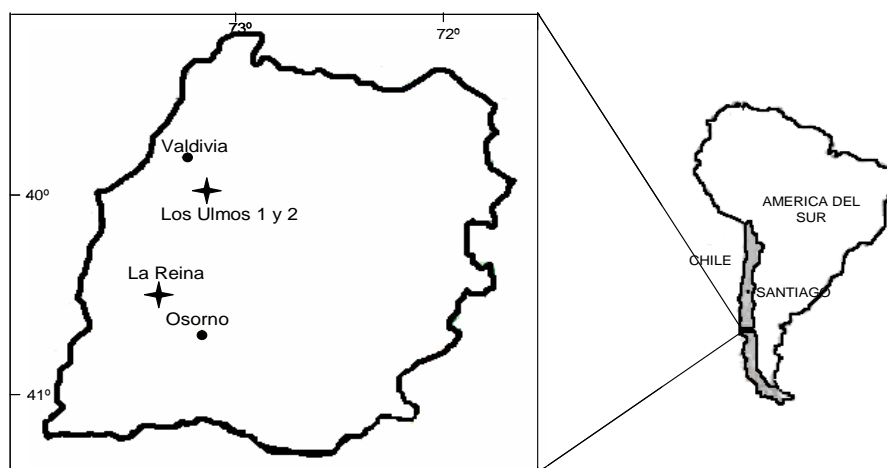


Figura 1. Mapa ubicación microcuencas experimentales

3.1.1 Antecedentes geográficos, clima y suelo

En el Cuadro 1 se dan a conocer los principales antecedentes de las microcuencas incluidas en el análisis: ubicación geográfica, tamaño y serie de suelo, entre otros.

Cuadro 1. Antecedentes generales de las cuencas estudiadas

Cuenca	Coordenadas geográficas	Superficie (ha)	Serie de Suelo	Altitud (m s.n.m.)
La Reina	40°20'25" S 73°27'59" W	34,4	Transición La Unión-Ñapeco	35 - 225
Los Ulmos 1	40°02'50" S 73°06'86" W	10,8	Los Ulmos	175 - 230
Los Ulmos 2	40°02'40" S 73°05'44" W	16,1	Transición Los Ulmos-Correltúe	70 - 160

Modificado Mayén (2003).

En todas las cuencas el clima es templado lluvioso con influencia mediterránea, con una precipitación anual que varía entre los 2.000 y 2.500 mm (Fuenzalida, 1965).

Los suelos en la cuenca La Reina corresponden a una transición entre las series La Unión y Ñapeco, que se encuentran principalmente en las provincias de Valdivia y Osorno, adosados a las formaciones precordilleranas de la costa. La serie La Unión es un suelo constituido por cenizas volcánicas muy antiguas depositadas sobre conglomerados volcánicos, mientras que la serie Ñapeco está constituida por arcillas antiguas sobre tobas volcánicas, andesíticas y basálticas (IREN, 1978).

La serie Los Ulmos presenta suelos rojos arcillosos, originados de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico de la costa. Los suelos de la serie Correltúe se ubican en la Cordillera de la Costa y por lo general son suelos profundos, de colores pardos oscuros a pardo muy oscuros en todo el perfil (IREN, 1978).

3.1.2 Descripción vegetacional

La vegetación predominante en las cuencas analizadas, corresponde a plantaciones de especies exóticas. Las especies principales, así como detalles de establecimiento y cosecha de las mismas, se dan a conocer en el Cuadro 2.

En el Anexo 2 y 3 se especifican las características dasométricas de las principales plantaciones establecidas en cada microcuenca.

En la cuenca La Reina, el bosque de *Pinus radiata* plantado en 1977 ocupó un 79,4% del área hasta 1999, año en que fue cosechada y reemplazada por una plantación de *Eucalyptus nitens*, establecida el año 2000. El 20,6% restante corresponde a vegetación nativa de protección a orillas de cursos de agua siendo las principales especies: *Drimys winteri*, *Nothofagus dombeyi* y *Eucryphia cordifolia* (Calisto, 2002).

Cuadro 2. Antecedentes de las plantaciones en las cuencas estudiadas.

Cuenca	Años	Cobertura vegetal
La Reina	1997-1999	Plantación <i>Pinus radiata</i> establecida el año 1977.
	1999-2000	Cosecha desde diciembre 1999 a marzo 2000.
	2000-2005	Plantación <i>Eucalyptus nitens</i> del año 2000.
Los Ulmos 1	2000-2005	Plantación <i>Eucalyptus nitens</i> del año 1997.
Los Ulmos 2	2000-2005	Plantación <i>Eucalyptus nitens</i> , <i>Pinus radiata</i> año 2000.

Para la cuenca Los Ulmos 1, el 81% del área total está cubierta por una plantación de *Eucalyptus nitens*, plantada en 1997, con presencia de *Ulex europeus* en el sotobosque. El 19% restante son caminos y vegetación de la zona de protección de cauces presenta *Chusquea quila*, *Rubus constrictus* y árboles jóvenes de *Embothrium coccineum*, *Nothofagus dombeyi* y *Eucryphia cordifolia* (Mayén, 2003).

La cuenca Los Ulmos 2 posee un mosaico de plantaciones, siendo las especies principales *Eucalyptus nitens* y *Pinus radiata*, establecidas el año 2000, las que cubren un 69% de la cuenca (Mayén, 2003). El 31% restante lo ocupan plantaciones de *Pseudotsuga menziesii* establecidas en igual año, *Nothofagus dombeyi* de 1992, *Eucalyptus globulus* de 1997, *Pinus radiata* de 1990 y a zonas de orilla de cauces de composición vegetal similar a la cuenca Los Ulmos 1 (Calisto, 2002).

3.2 Registro precipitación, determinación caudal y período de estudio

La precipitación total fue registrada a través de pluviógrafos instalados en cada una de las cuencas. La determinación de caudales se hizo a partir del registro continuo de altura del agua por medio de limnógrafos. Para obtener los valores de caudales promedios diarios se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Cuadro 3. Ecuaciones para determinar el caudal.

Cuenca	Los Ulmos 1 (*1)	Los Ulmos 2 (*1)	La Reina (*2)
Q (l/s) =	$0,0147 * h^{2.48}$	$0,0085 * h^{2.48}$	$1718,6 * h^{2.067}$

*1 Curvas teóricas, h (altura de la lámina de agua) en cm.

*2 Curvas definidas mediante aforos, h (altura de la lámina de agua) en m.

Estos registros constituyeron una base de datos con el registro de precipitación (mm) y caudal (l/s) a nivel horario para cada cuenca.

Para cada microcuenca se analizó el período de mayor extensión que permitió la información disponible, tanto de precipitación como caudal mediante pluviógrafos y limnógrafos respectivamente. Los espacios que se presentan en el Cuadro 4, son producto de anomalías en los equipos de medición anteriormente mencionados.

Cuadro 4. Período de estudio en cada cuenca.

Cuenca	Años									
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
La Reina	■									■
Los Ulmos 1				▨	▨	▨	▨	▨	▨	
Los Ulmos 2				■		■		■	■	

Para la cuenca La Reina, los datos de precipitación y caudal abarcan desde abril de 1997 hasta fines del 1999 (período pre-cosecha) y desde inicios del 2000 hasta octubre 2003 y luego del 29 de julio a noviembre de 2005 (período post-cosecha).

Para las cuencas Los Ulmos 1 y 2, el estudio comprende los años 2000 y 2001 completos, 2002 desde el 1º de enero al 6 de marzo; 2003 desde el 1º de enero al 28 de junio; 2004 desde el 12 de marzo hasta el 30 de septiembre; y 2005 desde el 14 de marzo al 17 de junio.

3.3 Eventos de precipitación

3.3.1 Clasificación precipitaciones

La metodología utilizada para agrupar los eventos difiere de la utilizada previamente por Mayén (2003) y Calisto (2002), en la cual los eventos de precipitación se estudiaron concentrados por estación del año. En este estudio se utiliza la metodología usada por Primrose (2004) donde los eventos de lluvia se agrupan de acuerdo a su volumen de precipitación.

Los eventos de lluvia para cada microcuenca fueron clasificados como se indica a continuación:

- Pequeños: 5 - 10 mm
- Medios: 10 - 50 mm
- Grandes: más de 50 mm.

Se decide agrupar las tormentas según el monto de la precipitación, ya que el coeficiente de determinación (R^2) para la relación entre el monto de precipitación del evento y caudal máximo es superior a la relación entre duración de los eventos de precipitación y caudal máximo. Los valores de los estadígrafos de estos análisis obtenidos para los datos de La Reina y Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2 están en los Anexos 4 y 5.

No se consideraron en esta investigación los eventos de lluvia inferiores a 5 milímetros, debido a su menor y aleatorio efecto en la generación de caudales máximos. Se consideró como un evento de lluvia a un período con precipitación sobre 5 milímetros, antecedido y seguido por períodos sin lluvia de al menos 5 horas.

Con los eventos categorizados de esta forma, se analizaron los caudales máximos generados, en las distintas microcuencas. Para La Reina, se compararon los períodos de pre y postcosecha y ya que el análisis se realizó sobre la misma cuenca, la unidad de caudal utilizada fue l/s. Para las cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2, de diferente tamaño, las comparaciones para estudiar las diferencias entre los caudales producto de la distinta edad de las plantaciones se realizó mediante un análisis de caudales unitarios (l/s/ha).

3.3.2 Eventos individuales

Además del análisis a nivel anual, se examinaron eventos individuales para cada uno de los años en estudio de cada microcuenca. Se seleccionaron eventos de crecidas generados por tormentas de lluvia similares para comparar las condiciones de pre y postcosecha en la cuenca La Reina, y efectuar una comparación entre las cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2, que presentan plantaciones de diferente desarrollo.

En la selección de estos eventos se tomó en cuenta el monto de la precipitación, su duración, la época del año en que ocurrieron y el tiempo transcurrido entre éste y el evento anterior así como la duración del evento antecesor.

3.4 Diferencias caudales máximos

Para comparar en las cuencas en estudio los valores de caudal máximo para los distintos períodos, se calculó como medida de tendencia central la mediana de los caudales máximos.

En el caso de La Reina, para estudiar la magnitud de los cambios en los caudales máximos luego de la cosecha a tala rasa, se comparó los caudales máximos del período pre-cosecha con los de post-cosecha y con cada año del período de post-cosecha (2000, 2001, 2002, 2003 y 2005).

Puesto que no se encontraron diferencias significativas entre los caudales máximos (categorizados por evento) entre los distintos años del periodo de pre-cosecha, se calculó el promedio de los caudales de pre-cosecha.

Para las cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2, se comparó los caudales máximos de cada cuenca para cada uno de los años del periodo de estudio.

Para comparar la magnitud en porcentaje de las diferencias en caudales máximos entre distintos períodos para la cuenca La Reina, y entre cuencas para Los Ulmos 1 y 2, se hizo uso de la relación de medias expresadas en porcentaje del tipo:

$$\Delta Q = |Q_{x1} / Q_{x2} - 1| * 100$$

Donde: ΔQ = Diferencias de medias de los caudales máximos (%)
 Q_{x1} = Valor medio cuenca 1
 Q_{x2} = Valor medio cuenca 2

En el caso de la cuenca La Reina, “cuenca 1”, representa el período pre-cosecha y “cuenca 2” el período post-cosecha, la unidad utilizada fue l/s. Para las cuencas Los Ulmos, “cuenca 1” designa a Los Ulmos 1 y “cuenca 2” a Los Ulmos 2, siendo la unidad usada l/s/ha.

Se realizó un análisis no paramétrico de los datos debido principalmente a lo reducido de algunas muestras ($n \geq 3$), producto de la categorización por tamaño de los eventos y por no contar con registros completos para cada año en estudio.

Las pruebas usadas en este tipo de análisis no presuponen una distribución de probabilidad para los datos y son usadas para muestras pequeñas ($n \leq 10$) en las que se desconoce si es válido suponer la normalidad de los datos. En estos casos se emplea como parámetro de centralización la mediana (Alce Ingeniería, 2005).

Se utilizó la prueba U de Mann-Whitney, la cual permite determinar si las muestras independientes fueron extraídas de poblaciones diferentes que poseen la misma distribución. Esta es una prueba equivalente, no paramétrica, a la prueba t de Student (Pizarro *et al.*, 2001). Para desarrollar el Test o Prueba de Mann Whitney, se utilizó el programa estadístico SPSS[®] (Statistical Package for the Social Sciences), el cual una vez ingresados los datos correspondientes, desplegó resultados con un 99% de confiabilidad, es decir, para p-valores menores o iguales que 0,01 no se puede concluir que ambas muestras provienen de una misma población o de poblaciones distintas con igual distribución (Pérez, 2001).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Categorización precipitaciones

En la Figura 2, se presenta la distribución de frecuencia para los eventos categorizados por tamaño, tanto para la cuenca La Reina como para las cuencas Los Ulmos 1 y 2. Éstas últimas comparten los datos de precipitación, ya que provienen de un mismo pluviógrafo.

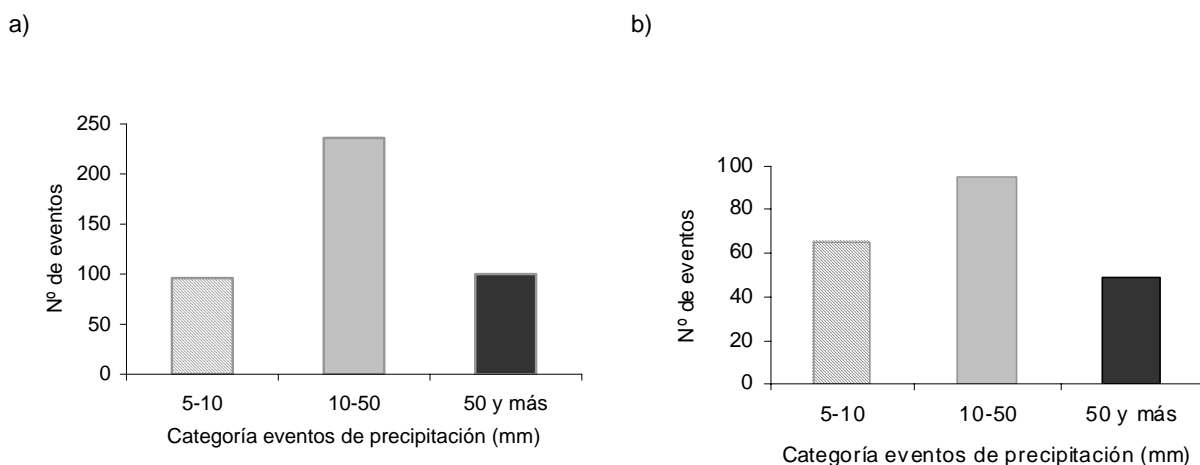


Figura 2. a) Frecuencia eventos de precipitación de la cuenca La Reina años 1997-2005; b) Frecuencia eventos de precipitación de la cuenca Los Ulmos, años 2000-2005

La distribución de frecuencia de las categorías de precipitación en ambas cuencas tiende a una normal, manteniéndose para La Reina la tendencia detectada por Primrose (2004).

4.2 Análisis de los caudales en la cuenca La Reina

4.2.1 Caudales máximos en La Reina

En el Cuadro 5, se presenta la mediana de los caudales máximos agrupados según el monto del evento de precipitación, correspondientes a los períodos de pre y post-cosecha.

Cuadro 5. Mediana caudales máximos del período de pre-cosecha y cada uno de los años de post-cosecha, por categoría de evento, cuenca La Reina

Período	Año	Categoría evento		
		Pequeño	Medio	Grande
Mediana Caudal máximo (l/s) Pre-cosecha	Todos	4.55	18.47	69.17
	Todos	13.76	24.51	124.06
Mediana Caudal máximo (l/s) Post-cosecha	2000	13.77	29.75	101.30
	2001	11.65	29.54	180.20
	2002	14.21	46.58	100.55
	2003	13.06	41.24	154.87
	2005	35.10	53.10	144.60

De los antecedentes presentados en el Cuadro 5, se puede apreciar que luego de la cosecha de la plantación de *Pinus radiata*, los caudales máximos en la cuenca La Reina resultaron superiores a los de la condición de pre-cosecha. Esto demuestra que la remoción de la cubierta vegetal tiene un efecto significativo en los caudales.

La comparación de las medianas de los caudales máximos de todos los años de pre-cosecha con todos los de post-cosecha, mostró que la mayor diferencia porcentual se manifestó para los eventos de pequeña magnitud con un 66,93 %, mientras que para los eventos medios y grandes fue de un 24,64 y 44,24 % respectivamente, Figura 3.

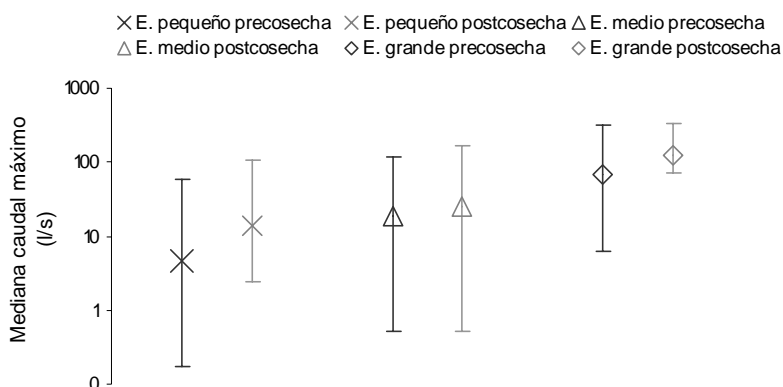


Figura 3. Diferencias entre las medianas del caudal máximo de los períodos de pre y post-cosecha, para eventos categorizados por tamaño.

Como una forma de ver las tendencias de los caudales de cada uno de los años del período de post-cosecha al compararlos con los del período de pre-cosecha, se

graficaron los datos expuestos en el Cuadro 5 anterior. Este análisis se muestra en la Figura 4.

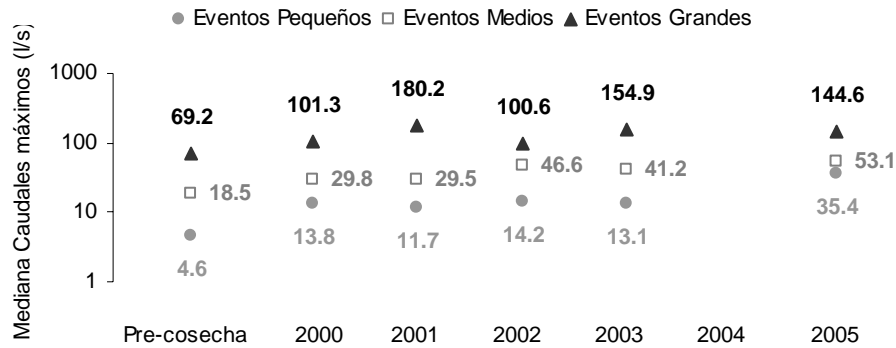


Figura 4. Mediana caudales máximos para el período de pre y cada uno de los años del periodo de post-cosecha, para eventos categorizados por tamaño.

En la Figura 4 se aprecia que los caudales máximos del período de precosecha son inferiores a los caudales de cada uno de los años de post-cosecha, para todas las categorías de tamaño de eventos de precipitación. Las diferencias son estadísticamente significativas (95%) para las tres categorías de eventos. Aún cuando los caudales del periodo de post-cosecha son mayores que los del de precosecha para todos los tamaños de eventos, el mayor incremento en los caudales ocurrió para la categoría de eventos menores. Esto se puede apreciar al comparar las diferencias en porcentaje de las medianas de los caudales máximos para las tres categorías de eventos, entre el período de pre-cosecha y los años 2000 y 2005 de post-cosecha, Cuadro 6.

Cuadro 6. Aumento porcentual de la mediana de caudales máximos en La Reina, en los años 2000 y 2005 en relación con los caudales del período precosecha.

Categoría Eventos	Aumento mediana caudal (%)	
	2000	2005
Pequeños	67	87
Medios	38	65
Grandes	32	52

El mayor incremento porcentual entre la mediana de los caudales máximos del período de precosecha y el año 2000 (1º año post-cosecha), fue para los eventos de menor magnitud, alcanzando un 67%. Para las categorías de eventos de precipitación medios y grandes los valores alcanzaron sólo valores de un 32 y 38% respectivamente. Se mantiene una relación similar en el año 2005 (aumento del 87, 65 y 52%, para eventos pequeños, medios y grandes respectivamente), destacándose además que luego de 5 años de desarrollo de la nueva plantación los caudales aún no parecen tender hacia la condición de precosecha.

Esto parece confirmar que el efecto de las operaciones forestales es de mayor importancia en eventos de periodos de retorno menores. Además, los resultados respecto a los valores de los caudales durante los primeros años luego de la remoción de la plantación no muestran un aumento importante inicial seguido de una gradual disminución tendiendo hacia los niveles de caudales de la condición de precosecha. No hay un patrón consistente para ninguna de las categorías de tamaño de eventos, y tampoco es posible notar, por ejemplo, un año particular del periodo de post-cosecha donde todas las medianas de caudales máximos hayan alcanzado un “máximo”.

4.2.2 Eventos individuales en La Reina

Eventos individuales fueron seleccionados para conocer el comportamiento de los caudales máximos a nivel más específico. En la elección de éstos se tomó en consideración lo mencionado en el capítulo 3.3.2.

Las características principales para seleccionar los eventos fueron el tamaño del evento y la época del año en que desarrollaron y se intentó que los eventos tuviesen una duración similar. Los eventos seleccionados tienen entre 80 y 150 mm de precipitación, se desarrollaron entre mayo y septiembre, la duración varió entre 44 y 70 horas y los eventos que los precedieron ocurrieron con 1 a 6 días de anterioridad. Mayor detalle de las lluvias seleccionadas se encuentra en el Cuadro 7 siguiente.

Cuadro 7. Antecedentes eventos individuales, cuenca La Reina

Año	Fecha (día-mes)	Altura pp. (mm)	Duración (h)	Días desde el evento anterior (días)
1997	1-jun	120.4	53	1
1999	25-may	102.6	52	5
2000	30-jul	133.2	50	5
2001	29-jun	124.0	44	6
2002	29-sep	150.8	70	2
2003	14-jun	112.0	45	1
2005	25-ago	82.6	66	3

Los hidrogramas de las escorrentías directas (caudal total menos caudal al inicio del evento) de los eventos seleccionados se presentan en la Figura 5 siguiente. Se representó el periodo de precosecha a través de los eventos de los años 1997 y 1999. Para el período de post-cosecha se dispone de eventos para los años 2000 a 2005, con excepción del año 2004 para el que no se cuenta con registros.

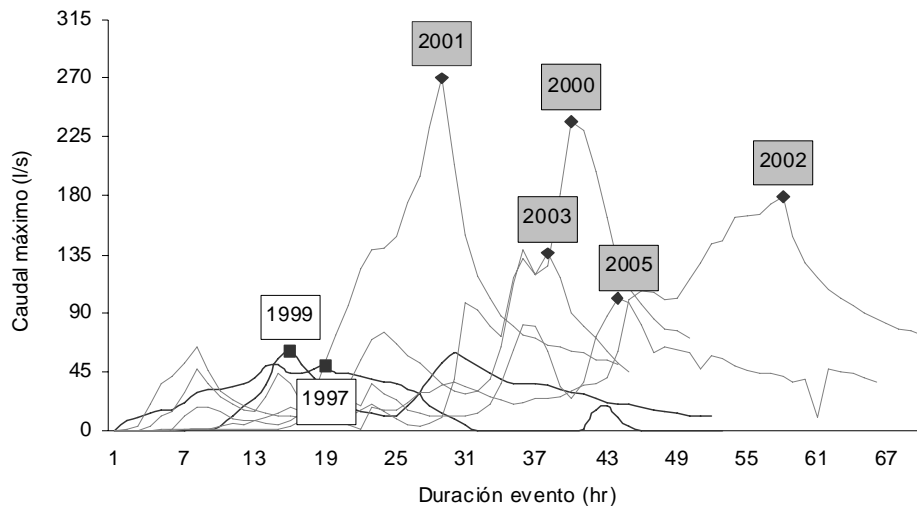


Figura 5. Eventos individuales cuenca La Reina para períodos de pre y post-cosecha

Tal como se puede apreciar de la Figura 5, se mantiene la tendencia dada en la Figura 3, resultando nuevamente superiores los valores de caudales máximos postcosecha desde 2000 a 2005 (236,3; 270,7; 178,8; 135,9 y 101,5 l/s) respectivamente, de los de precosecha (54,7 y 60,2 l/s) para los eventos individuales analizados.

Todos los eventos de precipitación corresponden a la categoría de evento “grande”, existiendo gran similitud con los resultados a escala anual dada para esta categoría de eventos en la Figura 3. Sin embargo, los eventos del año 2003 y 2005 muestran un menor caudal máximo, que el valor dado a escala anual, cuestión que podría estar mostrando que los caudales máximos están empezando una tendencia hacia los niveles de la condición de pre-cosecha.

El crecimiento y desarrollo de la plantación de *Eucalyptus nitens*, estaría ejerciendo un grado de influencia sobre la disminución de los caudales máximos, que no se percibe a escala anual sino sólo a nivel de eventos particulares. Una validación de esta hipótesis debe complementarse con registros de años posteriores.

4.3 Análisis de los caudales en las cuencas Los Ulmos

4.3.1 Categorización precipitaciones anuales

La frecuencia de los eventos para estas cuencas fue expuesta de manera general en la Figura 2 b). La distribución de eventos por categoría para cada año de estudio se presenta en la Figura 6.

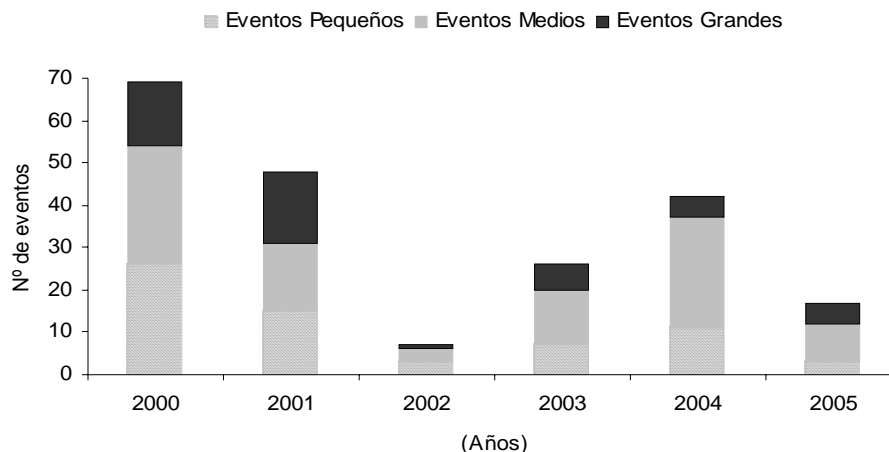


Figura 6. Distribución precipitaciones según categoría de tamaño para cada año en cuencas Los Ulmos.

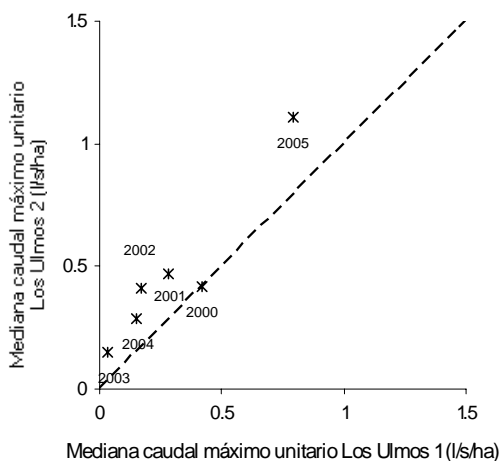
Se aprecia que se mantiene la tendencia dada en la Figura 2 b), donde la mayor proporción de eventos corresponde a la categoría media, a excepción del año 2001 en el cual los eventos grandes superan a ésta. El menor número de eventos del año 2002, se debe a que abarca sólo dos meses de verano.

4.3.2 Caudales máximos unitarios en Los Ulmos

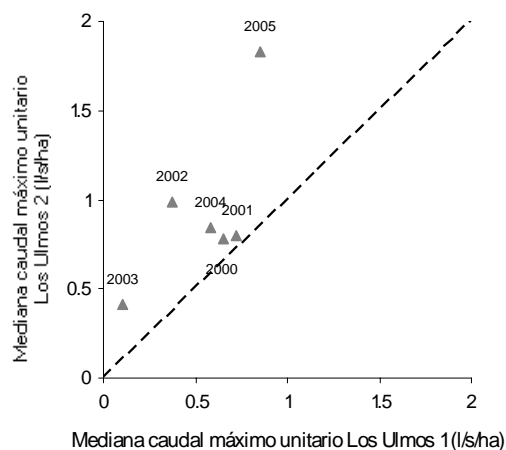
La comparación entre caudales máximos unitarios de las cuencas Los Ulmos 1 y 2, para cada uno de los años de estudio y por categoría de evento, se muestra en la Figura 7.

Para todas las categorías de tamaño de evento, los caudales unitarios de Los Ulmos 2 resultaron superiores a los de Los Ulmos 1, indicando que la plantación más desarrollada de la cuenca Los Ulmos 1, estaría ejerciendo una acción reguladora.

a) Eventos pequeños



b) Eventos medios



c) Eventos grandes

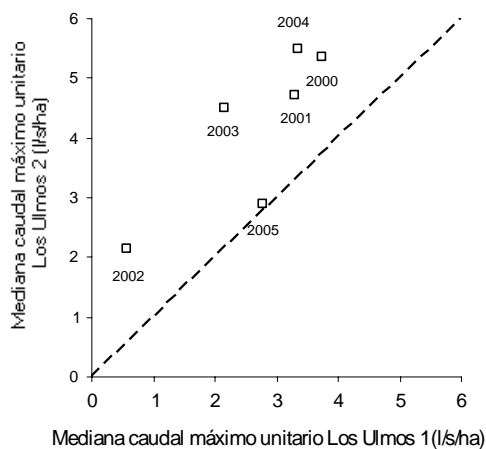


Figura 7. Mediana caudales máximos para eventos categorizados por tamaño, cuencas Los Ulmos

La comparación de las medianas y rangos de variación de los caudales máximos unitarios de las cuencas Los Ulmos, para cada categoría de evento, se presenta en la Figura 8. Este análisis se realizó para cada año del período de estudio.

El análisis que se resume en los gráficos de esta Figura 8, permite determinar la significancia estadística de los caudales máximos unitarios entre ambas cuencas.

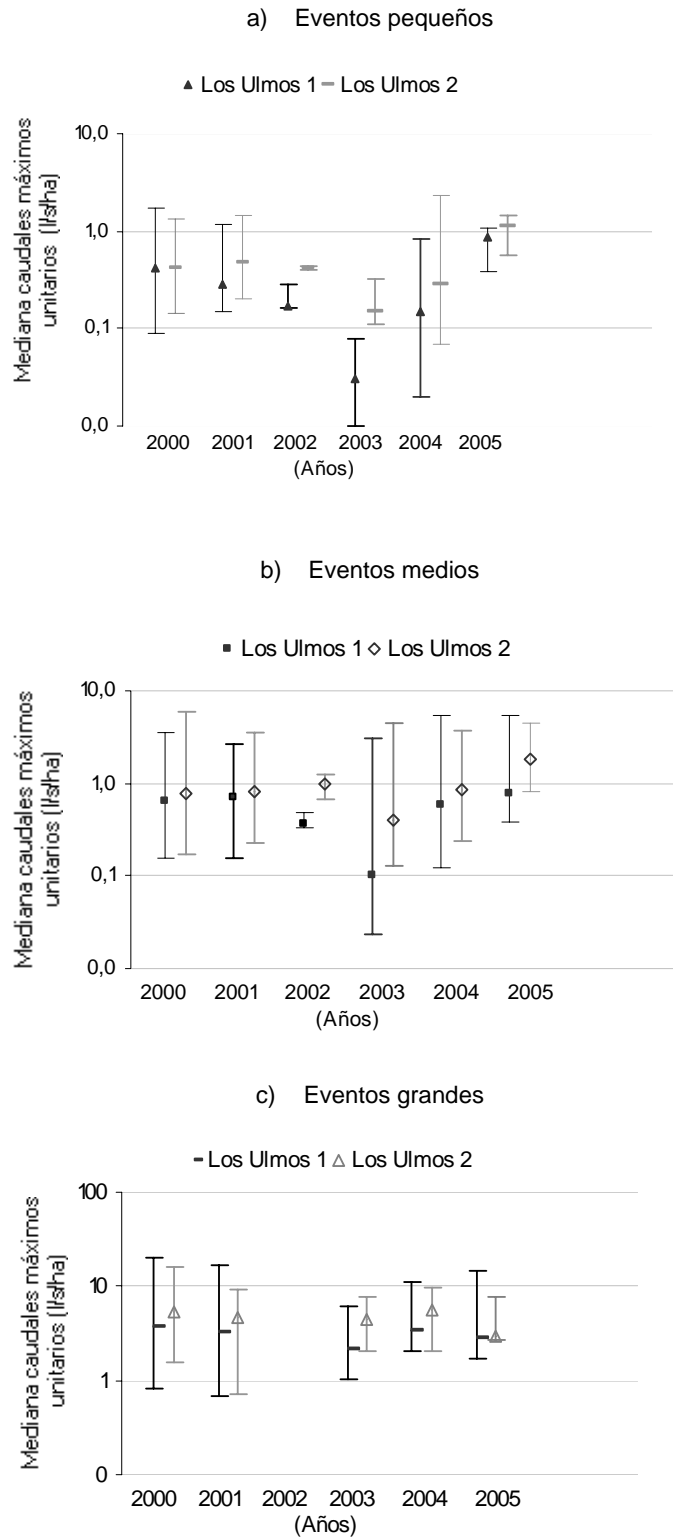


Figura 8. Comparación pareada mediana caudales máximos para eventos categorizados por tamaño para la cuenca Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2

Para la categoría de eventos pequeños, tanto la mediana como los valores máximos de caudales unitarios instantáneos son superiores en Los Ulmos 2 con respecto a los de Los Ulmos 1, desde el año 2001 al año 2005. Para este tamaño de evento, sólo las diferencias porcentuales de las medianas de los años 2001 y 2003 son estadísticamente significativas (Anexo 9).

En la categoría eventos medios, la tendencia que los valores máximos de caudales unitarios instantáneos de la cuenca Los Ulmos 2 superen a los de la cuenca Los Ulmos 1 ocurre sólo hasta el año 2003. Sin embargo, las medianas de los caudales máximos de Los Ulmos 2 superan a las de Los Ulmos 1 para todos los años en estudio. Para este tamaño de evento la diferencia porcentual entre las medianas de los caudales máximos de las cuencas es estadísticamente significativa sólo para el año 2003 (Anexo 10).

Para la categoría de evento de precipitación grande, los valores máximos de caudal unitario instantáneo correspondientes a cada año de estudio no presentan una tendencia dada. Las medianas de los caudales instantáneos unitarios de Los Ulmos 2 son superiores a las de Los Ulmos 1 para todos los años en estudio. Para esta categoría de tamaño, ningún año presenta diferencias porcentuales estadísticamente significativas (Anexo 11).

La categoría de evento “pequeño” es la que presenta mayor cantidad de años en los cuales las diferencias porcentuales resultaron estadísticamente significativas (años 2001 y 2003). Por ello se puede concluir que los caudales máximos para eventos pequeños, son superiores en la cuenca con la plantación de menor edad. Esto concuerda con lo planteado por Calder (1992), Zimmer (1998) y Beschta *et al.* (2000), acerca de que una real influencia de la cobertura arbórea sobre los caudales máximos es más notoria para eventos de pequeña magnitud.

Una de las ventajas de categorizar las precipitaciones por tamaño del evento fue que se pudo realizar un análisis más específico. Las tendencias mencionadas anteriormente no se hubiesen obtenido si las precipitaciones sólo se hubiesen agrupado por estación del año, tampoco si sólo se hubiese desarrollado su tendencia anual, como lo muestran las gráficas del Anexo 6.

Esto debido a que las diferencias en las tendencias entre ambas cuencas no son tan marcadas, como ocurre en la cuenca La Reina entre sus períodos de pre y postcosecha (Anexo 7).

En el análisis realizado por Calisto (2002) se señaló que en al comparar los caudales máximos generados por eventos categorizados por estación del año para estas cuencas, aún no era posible observar alguna diferencia en la generación de caudales, a pesar de la diferencia de edades entre las plantaciones de cada una. Lo cual se esperaba que ocurriese en años posteriores.

La clasificación de eventos según el monto de la precipitación mostró que en el año 2001 analizado por este autor, ya existía una diferencia para los caudales máximos

de ambas cuencas generados por eventos de pequeña magnitud, la cual no se observa al categorizar por estación del año en particular, ni en la gráfica de una tendencia anual.

Para el año 2005 se aprecia una similitud en el valor de las medianas del caudal máximo entre ambas cuencas, en especial para las categorías de eventos de precipitación pequeño y grande. Para la categoría de evento de precipitación pequeño para este año la diferencia porcentual fue de 23,4 % la menor desde el año 2001. Y para la categoría de evento de precipitación grande fue de 3,8% la menor de todo el período en estudio.

Esto podría indicar que ambas coberturas empiezan a comportarse de manera similar en términos de su aporte a los procesos de generación de escorrentía y que estas plantaciones con tres años de diferencia en edad, están llegando a un nivel de desarrollo tal, donde su efecto en la generación de caudales parece ser similar.

4.3.3 Eventos individuales en Los Ulmos

Para las cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2 se realizó un análisis similar al efectuado para eventos individuales en La Reina. Como en esta cuenca, las variables para seleccionar los eventos fueron tamaño y duración y época del año similares.

Las principales características de los eventos fueron: tamaño entre 160 y 210 mm, se desarrollaron entre mayo y junio, su duración fue entre 64 y 133 horas y los eventos que los precedieron ocurrieron con un día o 12 horas de anterioridad. Mayor detalle de las lluvias seleccionadas se encuentra en el Cuadro 8 siguiente.

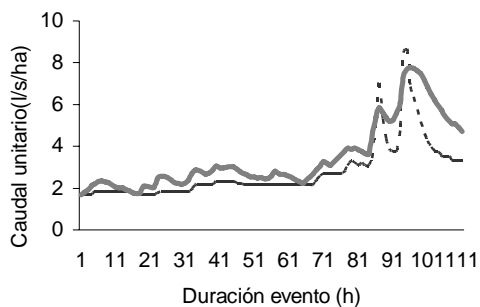
Cuadro 8. Antecedentes eventos individuales cuencas Los Ulmos

Año	Fecha (día-mes)	Altura pp. (mm)	Duración (h)	Evento anterior (días atrás)
2000	23-jun	161.8	111	1
2001	26-may	188.1	104	1
2003	13-jun	173.7	64	1
2004	19-jun	202.0	133	1
2005	25-may	210.4	92	0.5

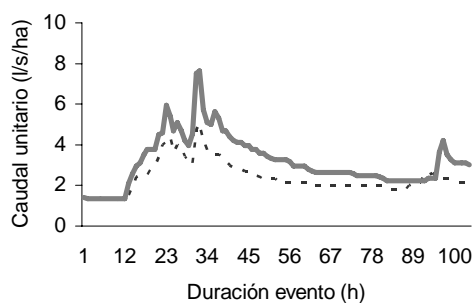
Los hidrogramas de las escorrentías directas (caudal total menos cuada al inicio del evento) de los eventos seleccionados se presentan en la Figura 9 siguiente.

..... Los Ulmos 1 ——— Los Ulmos 2

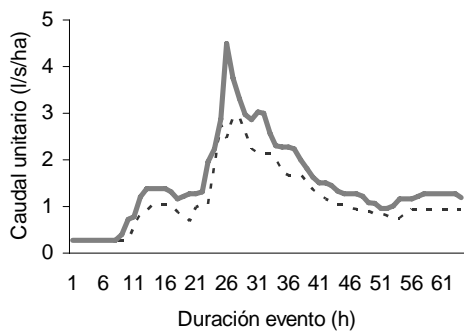
a) año 2000



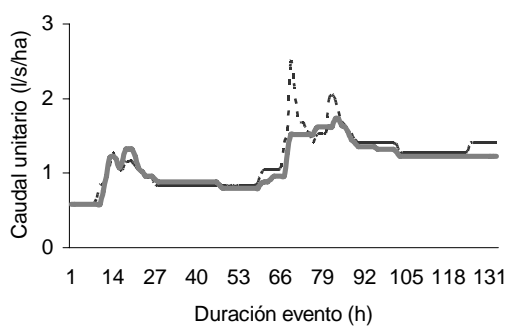
b) año 2001



c) año 2003



d) año 2004



e) año 2005

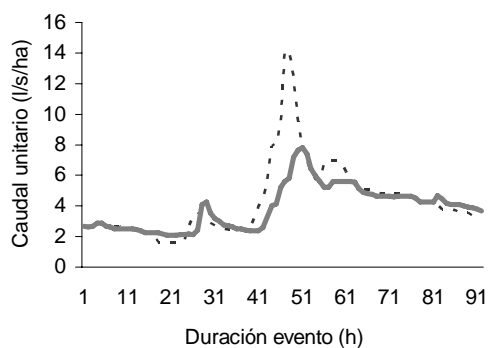


Figura 9. Eventos individuales cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2, para los años 2000-2005

Todos los eventos de precipitación considerados en este análisis corresponden a la categoría de eventos grandes. La comparación de hidrogramas de escorrentías unitarias directas no muestra una tendencia clara, ya que en algunos casos los caudales máximos son mayores en Los Ulmos 1 que en Los Ulmos 2, y en otros es a la inversa.

Sólo en los años 2001 y 2003, se mantiene la tendencia dada en la Figura 8 c) en que las medianas de los caudales máximos de la cuenca Los Ulmos 2 con la plantación de menor edad y por lo tanto de menor cobertura arbórea, supera a los valores de Los Ulmos 1.

Para este tipo de eventos podría aplicarse lo señalado por Castillo *et al.* (1997) quien se refiere a la importancia del contenido de humedad inicial del suelo, en la diferencia de la respuesta de escorrentía entre parcelas, razón por la cual para esta categoría de evento las gráficas no mostraron una tendencia clara.

Como sugerencia se presenta la de incluir en una investigación posterior eventos de precipitación de las dos categorías restantes, para comprobar si existe diferencia en relación al resultado dado para esta categoría.

5. CONCLUSIONES

- En la cuenca La Reina, los caudales máximos del periodo de post-cosecha son mayores a los registrados en el periodo de pre-cosecha, para todas las categorías de tamaño precipitación. La mayor diferencia porcentual entre las medianas, se manifestó en los caudales máximos generados por eventos de pequeña magnitud.
- Los resultados parecen confirmar que el efecto de la remoción de la cubierta vegetal es de mayor importancia en eventos de períodos de retorno menores.
- A cinco años de efectuada la cosecha de la plantación de *Pinus radiata* e igual período de crecimiento de la plantación *Eucalyptus nitens* con la que se reforestó, los caudales máximos a escala anual aún no tienden hacia los niveles de precosecha.
- El resultado de los eventos individuales estudiados para la cuenca La Reina, evidencian que el crecimiento y desarrollo de la plantación de *Eucalyptus nitens*, está ejerciendo un grado de influencia sobre la disminución de los caudales máximos, que no se percibe aún a escala anual, pero sí a nivel de eventos particulares.
- Los caudales máximos generados en la cuenca Los Ulmos 2, con una plantación de cinco años de edad, superan a los de la cuenca Los Ulmos 1, cuya plantación es de ocho años de edad, para la categoría de eventos pequeños, en los años 2001-2005, siendo las diferencias estadísticamente significativas para los años 2001 y 2003.
- En próximas investigaciones es conveniente evaluar si se mantiene la tendencia de caudales unitarios mayores de la cuenca Los Ulmos 2 sobre Los Ulmos 1.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Beschta, R.L., Pyles, M.R., Skaugset, A.E. and Surfleet, C.G. 2000. Peakflow Responses to Forest Practices in the Western Cascades of Oregon, USA, *Journal of Hydrology*, 233, 102-120.
- Blest, A.; Zhang, L., McMahon, T., Western, A., Vertessy, R. 2003. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. CSIRO Publication, Canberra. 56 p.
- Bonan, G. 2002. Ecological Climatology: concepts and applications. Cambridge University. Cambridge. United Kindom. 678 p.
- Burton, L. 2000. Introduction to Forestry Science. Albany: Delmar Publishers. New York, United States America. 498 p.
- Calder, I.R. 1992. The hydrological impact of land-use change. In: Proceeding of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management Natural Resources and Engineer Advisers Conference, Southampton, July 1992.
- Calder, I.R. 1999. The Blue Revolution, Earthscan, London.
- Calisto, J. D. 2002. Estudio comparativo de caudales máximos en cuencas con diferentes cobertura de bosque. Tesis Ing. Forestal. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Fac. de Cs. Forestales. 38 p.
- Castillo, V.M; Martínez-Mena, M. y Albaladejo, J. 1997. Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Science Society of America Journal*. 61: 1116-1121.
- Chang, M; Watters, S. 1984. Forest and other factors associated with sream flows in east Texas. *American Water Resources Association* 20 (5): 713-719
- Davie, T. 2003. Fundamentals of Hidrology. Roulledge, London. 169 p.
- Espíldora, B; Bronw, E.; Cabrera, G. Isensee, M. 1975. Elementos de Hidrología. Santiago, Chile. Centro de Recursos Hídricos de Chile. p.irr.
- Fahey, B. 1994. The effect of plantation forestry on water yield in New Zealand. *New Zealand Forestry* 39 (3): 18-23.
- Fahey, B.; Jackson, R. 1997. Hydrological impacts of converting native forest and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology* 84: 69-82.

- Folliot, P. 1997. Watershed Management in the Southwest: Training Course in Watershed Management. University of Arizona. 12 p.
- Fuenzalida, H. 1965. Clima en: Geografía Económica de Chile. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 99-152.
- Gayoso, J.; Iroumé, A. 1995. Impacto de las plantaciones sobre el ambiente físico. Bosque (Chile)16 (2):3-12.
- Gayoso, J.; Schlegel, B.; Acuña, M. 2000. Guía de conservación de agua. Proyecto Certificación Manejo Forestal Regiones VIII, X y XII. UACH. Valdivia. 50 p.
- Huber, A.; Oyarzún, C. 1983. Precipitación neta e interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. Don). Bosque (Chile) 5 (2): 59-64.
- IREN, 1978. Estudio de los suelos de la Prov. de Valdivia. Convenio Instituto de Recursos Naturales (IREN-CORFO) – Universidad de Chile. 225 p.
- Jones, J. 2000. Hydrologic processes and peak discharge response to forest removal, regrowth, and roads in 10 small experimental basin, western Cascades, Oregon. Water Resources Research 36: 2621-2642.
- Jones, J.; Grant, G. 1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads small and large basins, western Cascades, Oregon. Water Resources Research 32: 959-974.
- Keenan, R.; Kimmins, J. 1993. The ecological effects of clear-cutting. Environmental Review. 1:121-144.
- López, F.; Blanco, M. 1976. Hidrología Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España. 387 p.
- Manning, J. 1997. Applied Principles of Hydrology. 3ª Edition. Prince Hall, Inc. United States of America. 275 p.
- Mayén, J. 2003. Respuesta al cambio en los caudales estacionales, caudales máximos y en el transporte de sedimentos en cuencas experimentales de la X Región. Tesis Magister en Ciencias, Mención Recursos Forestales. Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 160 p.
- Miller, D. 1977. Water at the surface of the Earth. An Introduction to Ecosystem Hydrodynamics. International Geophysics Series Vol 21. Academic Press. London, United Kingdom. 557 p.

- Molinero, L. 2003. Bondad de ajuste a una normal, Transformaciones, Pruebas no paramétricas. **INTERNET**: <http://www.alceingenieria.net/bioestadística> (Noviembre 20, 2005)
- Pérez, C. 2001. Técnicas Estadísticas con SPSS. Madrid, Prentice Hall. 592 p.
- Pizarro, R.; Abarca, A.; Flores, J. 2001. Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad- Duración- Frecuencia (IDF) en 6 Estaciones Pluviográficas (VII Región del Maule, Chile). Universidad de Talca. 48 p.
- Primrose, H. 2004. Peak flow and Suspended Sediment Responses to Plantation Harvesting in the La Reina Catchment, Southern Chile. MSc Sustainable Management of the Water Environment. University of New Castle upon Tyne. United Kingdom. 96 p.
- Sáez, J. 1999. Caracterización de la microcuenca experimental “La Reina”, Provincia de Osorno y su aplicación al Sistema Hidrológico Europeo (Shetran). Tesis Ing. For. Valdivia (Chile). UACH, Fac. Cs. Forestales. 89p.
- Schulz, K. 2000. Caudales y sedimentos en suspensión para el período de verano en cuencas experimentales de la Décima Región, Chile. Tesis Ing. For. Valdivia (Chile). UACH, Fac. Cs. Forestales. 65p.
- Thomas, R.; Megahan, W. 1998. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades Oregon: a second opinion. Water Resources Research 34: 3393-3403.
- Zimmer, R. 1998. Flooding and Stormflows. USDA Forest Service General Technical Report. PSW-168, 1

ANEXOS

ANEXO 1

Abstract and Keywords

ABSTRACT AND KEYWORDS

This study compares peak flows in experimental catchments with different forest covers located in the Tenth Region of Chile. The studies were carried out on three catchments known as La Reina, Los Ulmos 1 and Los Ulmos 2.

At the La Reina catchment the *Pinus radiata* plantation was clearcut in 1999 and then reforested with *Eucalyptus nitens* in year 2000. The analysis included comparison of peak flows between pre (1997-1999) and the post (2000-2005) harvesting periods.

Los Ulmos 1 and Los Ulmos 2 are covered by *Eucalyptus nitens* plantations. The plantation at Los Ulmos 1 is three years older than the Los Ulmos 2 plantation, and in this case the analysis intended to compare the effect of this difference in peak flows.

The comparisons were carried out considering median peak flows generated by three different sizes of rainfall events: small (5 to 10 mm), medium (10 to 50 mm) and large (more than 50 mm).

Peak flows increased after clearcutting the La Reina plantation, and major differences in median peak flow values occurred for the 'small' events category. The difference in age between the two Los Ulmos catchments affected peak flows generated by the smaller rainfall events.

These results tend to confirm that the effect of forest cover on peak flow values is less important during larger and more extreme rainfall events.

Keywords: experimental catchment, peak flow, forest cover.

ANEXO 2

Tablas de Rodal Cuenca La Reina

Tabla rodal año 1998
Plantación *Pinus radiata* (pre-cosecha)

DAP (cm)	N (arb/ha)	H (m)	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
12.5	307	14.1	3.81	0.37
17.5	140	15.4	3.66	7.37
22.5	180	17.1	7.7	30.51
27.5	153	18.8	9.49	49.11
32.5	147	20.2	12.42	76.14
37.5	93	21.9	10.76	75.06
42.5	113	23.3	16.52	126.57
47.5	47	24.2	8.3	66.79
52.5	13	25.5	2.89	25.16
57.5	7	26.8	1.88	17.43
Total	1200		77.44	474.52

Tabla rodal año 2005
Plantación *Eucalyptus nitens*

Clase DAP (cm)	N (arb/ha)	H (m)	G (m ² /ha)
7.5	275	12.2	3.37
12.5	875	15.4	21.05
17.5	150	18.7	5.96
Total	1300		30.38

ANEXO 3

Tablas de Rodal
Cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2

Tabla rodal Los Ulmos 1 año 2005
Plantación *Eucalyptus nitens*

DAP (cm)	N (arb/ha)	H (m)	G (m ² /ha)
7.5	25	15.5	0.11
12.5	125	18.9	1.53
17.5	425	22.3	10.22
22.5	725	25.7	28.83
Total	1300		40.69

Tabla rodal Los Ulmos 2 año 2005
Plantación *Eucalyptus nitens*

DAP (cm)	N (arb/ha)	H (m)	G (m ² /ha)
2.5	125	5.8	0.06
7.5	425	8.1	1.88
12.5	225	10.5	2.76
17.5	250	12.8	6.01
22.5	25	15.2	0.99
Total	1050		11.71

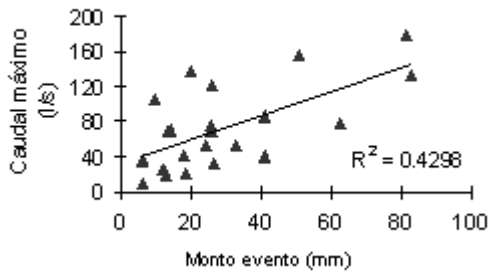
Tabla rodal Los Ulmos 2 año 2005
Plantación *Pinus radiata*

DAP (cm)	N (arb/ha)	H (m)	G (m ² /ha)
2.5	250	3.5	0.12
7.5	725	4.9	3.20
12.5	225	6.2	2.76
Total	975		6.09

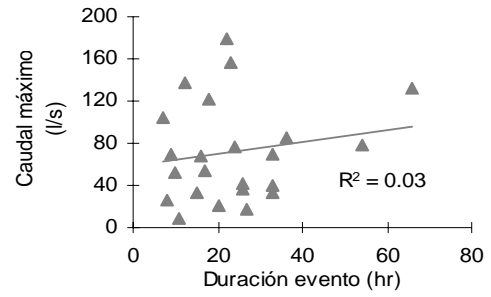
ANEXO 4

R² Cuenca La Reina

a)

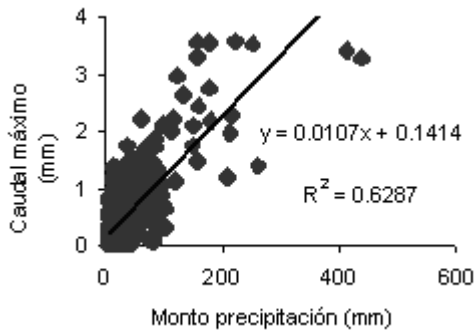


b)

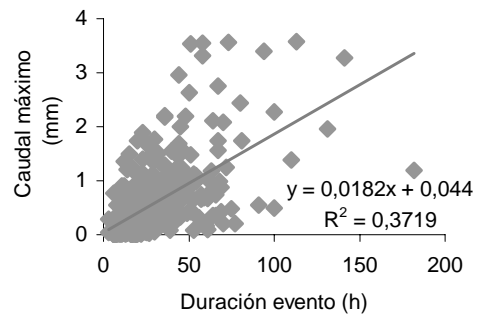


a) Monto evento de precipitación v/s Caudal máximo y b) Duración evento v/s Caudal máximo Cuenca La Reina año 2005.

c)



d)

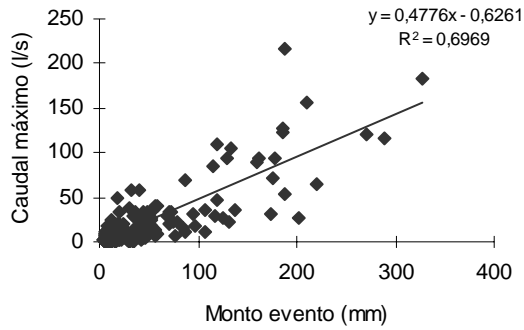


a) Monto evento de precipitación v/s Caudal máximo y b) Duración evento v/s Caudal máximo Cuenca La Reina años 1997-2003.

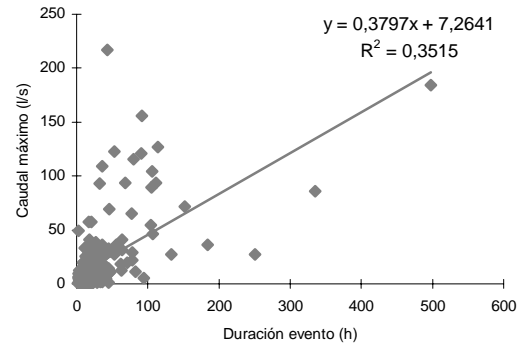
ANEXO 5

R² Cuenca Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2

a)

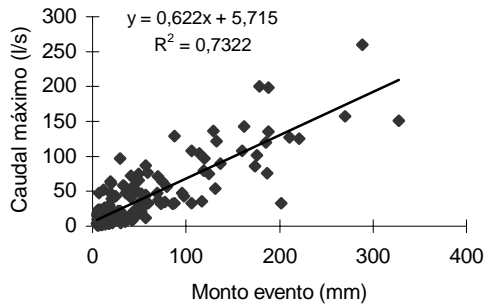


b)

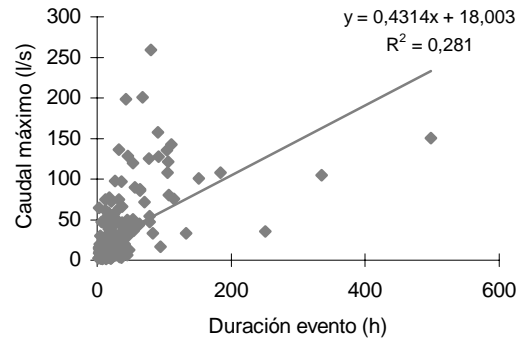


a) Monto evento de precipitación v/s Caudal máximo y b) Duración evento v/s Caudal máximo Cuenca Los Ulmos 1.

c)



d)



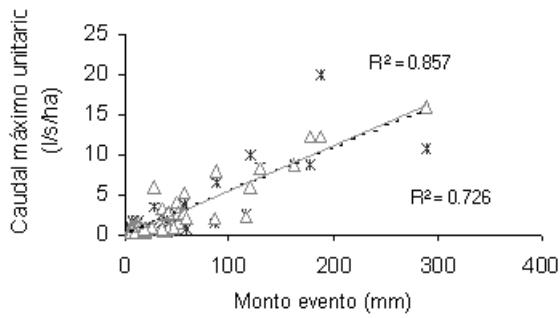
c) Monto evento de precipitación v/s Caudal máximo y d) Duración evento v/s Caudal máximo Cuenca Los Ulmos 2.

ANEXO 6

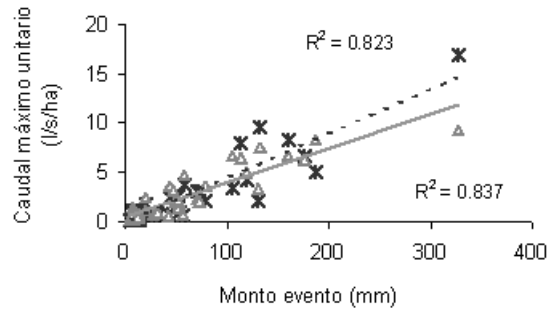
Tendencia caudales máximos cuenca Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2

* Los Ulmos 1 Δ Los Ulmos 2
Tendencia Los Ulmos 1 —————Tendencia Los Ulmos 2

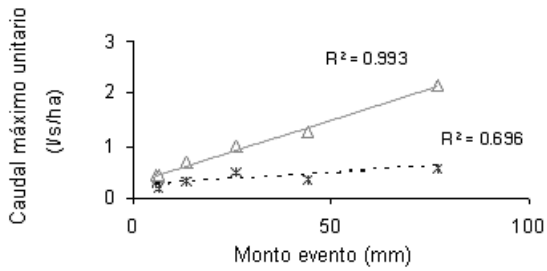
a) año 2000



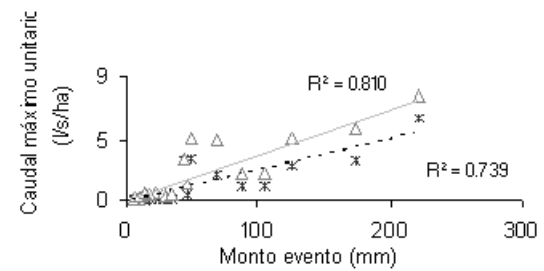
b) año 2001



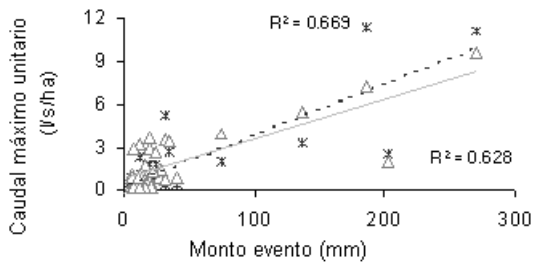
c) año 2002



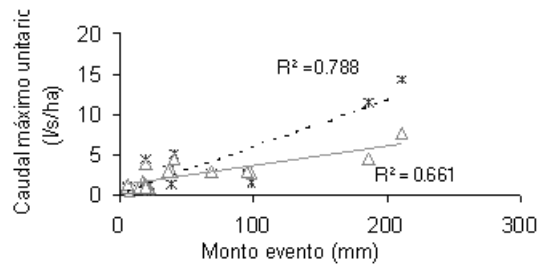
d) año 2003



e) año 2004



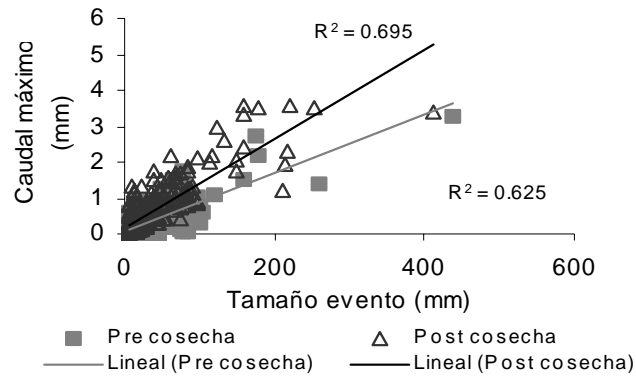
f) año 2005



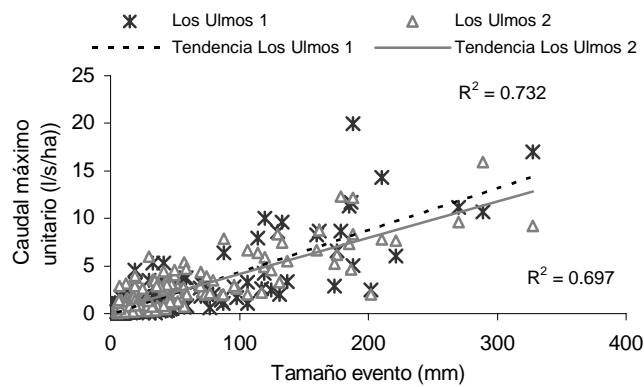
ANEXO 7

Tendencia comportamiento caudales máximos
Cuenca La Reina - Cuenca Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2

Tendencia caudales máximos pre y post-cosecha Cuenca La Reina
Años 1997-2003



Tendencia caudales máximos cuencas Los Ulmos 1 y Los Ulmos 2
Años 2000-2005



ANEXO 8

Prueba de Mann- Whitney - Cuenca La Reina
Eventos pequeños-medios-grandes
Año 2005

Eventos pequeños

Rangos

años	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s) precosecha	40	20,80	832,00
2005	4	39,50	158,00
Total	44		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s)
U de Mann-Whitney	12,000
W de Wilcoxon	832,000
Z	-2,776
Sig. asintót. (bilateral)	,006
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,002 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: años

Eventos medios

Rangos

años	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s) precosecha	95	50,74	4820,00
2005	15	85,67	1285,00
Total	110		

Estadísticos de contraste^a

	Caudal máx. (l/s)
U de Mann-Whitney	260,000
W de Wilcoxon	4820,000
Z	-3,941
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Variable de agrupación: años

Eventos grandes

Rangos

	años	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s)	precosecha	38	20,32	772,00
	2005	4	32,75	131,00
	Total	42		

Estadísticos de contraste ^b

	Caudal máx. (l/s)
U de Mann-Whitney	31,000
W de Wilcoxon	772,000
Z	-1,928
Sig. asintót. (bilateral)	,054
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	,054 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: años

ANEXO 9

Prueba de Mann-Whitney - Cuenca Los Ulmos 1 y 2
Eventos pequeños años 2000-2005

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2000	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	26	24.54	638.00
	2	26	28.46	740.00
	Total	52		

Estadísticos de contraste^a

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	287.000
W de Wilcoxon	638.000
Z	-.934
Sig. asintót. (bilateral)	.350

a. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2000

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2001	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	15	8.00	120.00
	2	15	23.00	345.00
	Total	30		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	.000
W de Wilcoxon	120.000
Z	-4.673
Sig. asintót. (bilateral)	.000
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.000 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2001

Rangos

	Cuenca Los Ulmos 2002	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	3	2.00	6.00
	2	3	5.00	15.00
	Total	6		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	.000
W de Wilcoxon	6.000
Z	-1.964
Sig. asintót. (bilateral)	.050
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.100 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos 2002

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2003	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	7	4.00	28.00
	2	7	11.00	77.00
	Total	14		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	.000
W de Wilcoxon	28.000
Z	-3.144
Sig. asintót. (bilateral)	.002
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.001 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2003

Rangos

	Cuenca Los Ulmos Año 2004	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	11	9.55	105.00
	2	11	13.45	148.00
	Total	22		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	39.000
W de Wilcoxon	105.000
Z	-1.413
Sig. asintót. (bilateral)	.158
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.171 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos Año 2004

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2005	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	3	2.67	8.00
	2	3	4.33	13.00
	Total	6		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	2.000
W de Wilcoxon	8.000
Z	-1.091
Sig. asintót. (bilateral)	.275
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.400 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2005

ANEXO 10

Prueba de Mann-Whitney - Cuenca Los Ulmos 1 y 2
Eventos medios años 2000-2005

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2000	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	28	23.29	652.00
	2	28	33.71	944.00
	Total	56		

Estadísticos de contraste^a

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	246.000
W de Wilcoxon	652.000
Z	-2.394
Sig. asintót. (bilateral)	.017

a. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2000

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2001	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	16	15.25	244.00
	2	16	17.75	284.00
	Total	32		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	108.000
W de Wilcoxon	244.000
Z	-.754
Sig. asintót. (bilateral)	.451
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.468 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2001

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2002	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	3	2.00	6.00
	2	3	5.00	15.00
	Total	6		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	.000
W de Wilcoxon	6.000
Z	-1.964
Sig. asintót. (bilateral)	.050
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.100 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2002

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2003	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	13	9.46	123.00
	2	13	17.54	228.00
	Total	26		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	32.000
W de Wilcoxon	123.000
Z	-2.696
Sig. asintót. (bilateral)	.007
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.006 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2003

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2004	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	26	22.81	593.00
	2	26	30.19	785.00
	Total	52		

Estadísticos de contraste^a

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	242.000
W de Wilcoxon	593.000
Z	-1.758
Sig. asintót. (bilateral)	.079

a. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2004

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2005	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	9	8.11	73.00
	2	9	10.89	98.00
	Total	18		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	28.000
W de Wilcoxon	73.000
Z	-1.104
Sig. asintót. (bilateral)	.269
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.297 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2005

ANEXO 11

Prueba de Mann-Whitney - Cuenca Los Ulmos 1 y 2
Eventos grandes años 2000-2005

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2000	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	15	14.93	224.00
	2	15	16.07	241.00
	Total	30		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	104.000
W de Wilcoxon	224.000
Z	-.353
Sig. asintót. (bilateral)	.724
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.744 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2000

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2001	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	17	17.06	290.00
	2	17	17.94	305.00
	Total	34		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	137.000
W de Wilcoxon	290.000
Z	-.258
Sig. asintót. (bilateral)	.796
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.812 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2001

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2003	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	6	5.00	30.00
	2	6	8.00	48.00
	Total	12		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	9.000
W de Wilcoxon	30.000
Z	-1.441
Sig. asintót. (bilateral)	.150
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.180 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2003

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2004	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	5	5.40	27.00
	2	5	5.60	28.00
	Total	10		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	12.000
W de Wilcoxon	27.000
Z	-.104
Sig. asintót. (bilateral)	.917
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	1.000 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2004

Rangos

	Cuenca Los Ulmos año 2005	N	Rango promedio	Suma de rangos
Caudal máx. (l/s/ha)	1	5	5.40	27.00
	2	5	5.60	28.00
	Total	10		

Estadísticos de contraste^b

	Caudal máx. (l/s/ha)
U de Mann-Whitney	12.000
W de Wilcoxon	27.000
Z	-.105
Sig. asintót. (bilateral)	.917
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	1.000 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cuenca Los Ulmos año 2005