



Tesis de Maestría en Ingeniería
Mecánica de los Fluidos Aplicada

Facultad de Ingeniería
Universidad de la República, Uruguay



MODELACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS ASOCIADOS A LA FORESTACIÓN CON EUCALYPTUS EN EL URUGUAY

Jimena Alonso



Director de Tesis: Dr. Ing. Luis Silveira

Agosto 2011

AGRADECIMIENTOS

La línea de investigación en la que se enmarca este trabajo de tesis está liderada, desde hace más de 10 años, por el grupo de Hidrología del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA). A Luis Silveira responsable del grupo y tutor de esta tesis, es a quién quiero agradecer en primer lugar, por su apoyo constante y orientación tanto en este trabajo como en todos los que ha guiado en mi actividad de investigación.

Agradezco a la Comisión Académica de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y al Programa de Desarrollo Tecnológico del Ministerio de Educación y Cultura, por las becas de estudio que me otorgaron en el marco de esta Maestría, las cuales posibilitaron la realización de los cursos y la estadía en la Universidad de Newcastle.

Muchos docentes y compañeros contribuyeron a la concreción de esta tesis, a todos les estoy profundamente agradecida.

En particular a los Profesores de la Universidad Austral de Chile Andrés Iroumé y Anton Huber, quienes a partir de los primeros intercambios orientaron el comienzo de este trabajo, facilitaron su desarrollo y aportaron a mi formación académica. También agradezco especialmente a los Profesores James Bathurst y Steven Birkinshaw de la Universidad de Newcastle por facilitar mis inicios en la modelación hidrológica distribuida y por sus valiosos aportes en la segunda etapa de este trabajo.

Mucho agradezco la valiosa colaboración de la Prof. Carolina Munka de la Facultad de Agronomía, quién posibilitó el trabajo de campo para la determinación del IAF, realizado a fines del 2008 compartiendo generosamente su experiencia y conocimientos. También al Dr. George Chescheir de la Universidad de Carolina del Norte, por facilitar el uso del instrumental para la toma de las fotografías hemisféricas.

La información de base de esta tesis es en gran parte producto de los proyectos “Indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable de las plantaciones de Eucaliptos en el Uruguay” y “Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo”, financiados por el PDT - MEC y el INIA respectivamente. La generación de esa base de datos no hubiera sido posible sin la valiosa participación de los compañeros que formaron parte del equipo en todas las etapas, en particular quiero agradecer a Leticia Martínez, Pedro de Izaguirre y Christian Chreties con quienes disfrutamos y “sufrimos” largas jornadas durante la instalación de las microcuencas, cuando la falta de experiencia era subsanada con una enorme cuota de voluntad, creatividad y buen humor.

A mis compañeros de estudios en la Maestría, los “viejos jóvenes” del IMFIA un agradecimiento especial por su apoyo y compañía desde que empezamos este camino y en particular a Mariana Mendina por su aliento durante el último tramo recorrido.

Nada de esto hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia, de mi madre, el de mi padre siempre presente en mi corazón y en especial el de David.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

ÍNDICE DEL CONTENIDO.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABLAS.....	7
RESUMEN.....	9
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 EFECTOS DE LA FORESTACIÓN SOBRE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS	18
1.3 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	21
2 LA INTERCEPCIÓN DEL DOSEL FORESTAL	25
2.1 EVAPORACIÓN.....	25
2.1.1 <i>Evapotranspiración en bosques.....</i>	<i>25</i>
2.1.2 <i>Estimación de la evaporación en el dosel.....</i>	<i>28</i>
2.2 REDISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	31
2.2.1 <i>Modelo de Rutter.....</i>	<i>35</i>
2.2.1 <i>Modificación del modelo de Rutter</i>	<i>37</i>
2.2.2 <i>Modelo de Gash.....</i>	<i>38</i>
2.2.3 <i>Modificación del modelo de Gash para bosque ralo</i>	<i>42</i>
3 ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DE BASE	47
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	47
3.1.1 <i>Clima y características hidrológicas.....</i>	<i>47</i>
3.1.1 <i>Vegetación y uso del suelo.....</i>	<i>49</i>
3.1.2 <i>Topografía</i>	<i>50</i>
3.1.3 <i>Características de los suelos.....</i>	<i>51</i>
3.1.4 <i>Geología.....</i>	<i>54</i>
3.2 MONITOREO DE LA INFORMACIÓN DE BASE	56
4 PARÁMETROS ESTRUCTURALES DEL DOSEL FORESTAL	61
4.1 PARÁMETROS GENERALES DE LA MODELACIÓN DE REDISTRIBUCIÓN	61

4.1.1	<i>Escurrimiento fustal (pf y Sf)</i>	61
4.1.2	<i>Almacenamiento del dosel, coeficiente de atravesamiento libre y cobertura del dosel</i> .	61
4.1.3	<i>Tasa de drenaje del dosel (Ds)</i>	62
4.1.4	<i>Análisis de la información monitoreada</i>	62
4.1.5	<i>Resultados</i>	67
4.2	ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)	69
4.2.1	<i>Definición y características</i>	69
4.2.2	<i>Metodología para su estimación</i>	69
4.2.3	<i>Procedimiento para la determinación del IAF mediante fotografía hemisférica</i>	73
4.2.4	<i>Resultados</i>	75
5	IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS	79
5.1	VARIABLES DE ENTRADA Y PARÁMETROS	79
5.2	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS	80
5.2.1	<i>Modelo de Gash para dosel ralo</i>	81
5.2.2	<i>Modelo de Rutter</i>	86
5.3	SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS	88
5.4	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE ZHANG EN LAS MICROCUENCAS	92
6	MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS MICROCUENCAS	97
6.1	EL MODELO HIDROLÓGICO SHETRAN.....	97
6.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	99
6.3	RESULTADOS.....	101
6.3.1	<i>Análisis de la información monitoreada</i>	101
6.3.2	<i>Calibración del modelo en las dos microcuencas</i>	103
6.4	SIMULACIÓN DE LA FORESTACIÓN EN LA CANTERA.....	106
7	CONCLUSIONES	111
8	BIBLIOGRAFÍA	117
9	ANEXO – PUBLICACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DEL TRABAJO DE TESIS	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Evolución de la superficie forestada en Uruguay	14
Figura 2.1	Principales caminos de evaporación [tomado de Calder, 2005]	26
Figura 2.2	Diferencia de ETR entre bosques y pasturas como porcentaje de la precipitación media anual (en inglés MAP), [tomada de Peel et al, 2002].	27
Figura 2.3	Esquema conceptual del modelo de Rutter [adaptado de Gash y Morton, 1978].....	36
Figura 3.1	Ubicación del área de estudio	47
Figura 3.2	Distribución anual de la precipitación y escurrimiento (1970 – 1999), medias anuales y desviaciones estándar (columnas); media anual y desviación estándar (líneas), [adaptado de Genta et al., 2001]	49
Figura 3.3	Distribución espacial de la plantación en la microcuenca Don Tomás.....	50
Figura 3.4	Grilla de distribución de elevación a) Don Tomás; b) La Cantera	51
Figura 3.5	Mapa de suelos de las microcuencas: a) Don Tomás; b) La Cantera	53
Figura 3.6	Secuencia sedimentaria	54
Figura 3.7	Características hidrogeológicas	55
Figura 3.8	a) Pluviógrafo en La Cantera; b) pluviógrafo en Don Tomás; c) estación meteorológica	56
Figura 3.9	Instalaciones para el monitoreo de la precipitación directa y fustal	57
Figura 3.10	Vertederos y obras de cierre a la salida de las microcuencas.....	57
Figura 4.1	Distribución de frecuencia de la cantidad de precipitación	63
Figura 4.2	Distribución de frecuencia de la duración de la precipitación	64
Figura 4.3	Variación de la interceptación con la precipitación incidente a nivel diario, datos observados del período jul/06-dic/09.....	65
Figura 4.4	Relación Precipitación fustal – Precipitación incidente, para eventos diarios.....	67
Figura 4.5	Relación Precipitación directa – Precipitación incidente, para eventos diarios.....	68
Figura 4.6	Dos de las imágenes escaneadas para medida directa del IAF.	71

Figura 4.7	Fotografía Hemisférica de la parcela experimental de <i>Eucayptus</i>	72
Figura 4.8	Posición de los pixel de borde para distintos umbrales [tomada de Nobis y Hunziker, 2005].	73
Figura 4.9	Posición de las fotografías dentro de cada parcela.	74
Figura 4.10	a) Imagen original; b) Imagen binaria con umbral automático.....	75
Figura 4.11	Fotografías hemisféricas: a) entrefila de parcela central del rodal; b) fila de parcela central del rodal; c) entrefila de parcela en límite exterior del rodal; d) fila de parcela en límite exterior del rodal.....	76
Figura 5.1	Variantes de cálculo de \bar{E} , para la aplicación del modelo de Gash modificado.....	82
Figura 5.2	Primera estimación de las componentes de precipitación directa (izq) y fustal (der).....	82
Figura 5.3	Intercepción acumulada en el período de calibración según las variantes de cálculo de \bar{E}	85
Figura 5.4	Ajuste del modelo de redistribución de Rutter modificado	87
Figura 5.5	Sensibilidad del modelo de Gash expresada como ϵ_{Nash}	89
Figura 5.6	Sensibilidad del modelo de Gash expresada como ϵ_V	89
Figura 5.7	Sensibilidad del modelo de Rutter expresada como ϵ_{Nash}	90
Figura 5.8	Sensibilidad del modelo de Rutter expresada como ϵ_V	90
Figura 5.9	Evapotranspiración en las microcuencas, observada y simulada según Zhang	94
Figura 6.1	Esquema del SHETRAN en columnas y celdas [tomada de Ewen et al. 2000].....	98
Figura 6.2	Análisis doble masa de escurrimientos observados	101
Figura 6.3	Relación entre caudales máximos de eventos	103
Figura 6.4	Comparación de caudales observados y simulados en La Cantera	104
Figura 6.5	Comparación de caudales observados y simulados en Don Tomás	104
Figura 6.6	Comparación de caudales simulados con pastura y con forestación en La Cantera....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Rugosidad en superficies con vegetación alta, [tomado de Wieringa, 1992 y 1993].	29
Tabla 2.2	Comparación de la fracción interceptada por <i>Eucalyptus</i>	33
Tabla 2.3	Cálculo de las componentes de la intercepción [tomado de Gash, 1979]	41
Tabla 2.4	Parámetros y formulación del modelo de Gash para dosel ralo [adaptado de Gash et al., 1995]	43
Tabla 3.1	Características hidrológicas de las microcuencas.....	48
Tabla 3.2	Caracterización de la plantación.....	50
Tabla 3.3	Descripción textural de los suelos de Don Tomás	52
Tabla 3.4	Descripción textural de los suelos de La Cantera	52
Tabla 4.1	Parámetros estadísticos para la serie de eventos identificados	63
Tabla 4.2	Información observada, acumulados mensuales	66
Tabla 4.3	Valores de IAF para los distintos sitios y posiciones evaluados	76
Tabla 5.1	Tasas medias de precipitación mensuales para la aplicación del modelo de Gash modificado	81
Tabla 5.2	Características e indicadores de los 11 modelos de evaporación usados en la calibración del modelo de Gash ralo.	84
Tabla 5.3	Intervalos de variación de los parámetros	88
Tabla 5.4	Variables observadas en las microcuencas de Don Tomás (DT), forestada y La Cantera (LC) pasturas, valores en mm/año [tomado de Silveira et al. (2010b)].	92
Tabla 5.5	Simulación de la intercepción con el modelo de Gash, para el total de la precipitación registrada en la parcela experimental de Don Tomás (Oct/06-Set/09).	93
Tabla 6.1	Principales procesos y ecuaciones en el componente hidrodinámico del SHETRAN.....	98
Tabla 6.2	Períodos del análisis doble masa.....	102

Contenido

Tabla 6.3	Principales parámetros calibrados en La Cantera	105
Tabla 6.4	Principales parámetros calibrados en Don Tomás	105
Tabla 6.5	Diferencias de volumen de escurrimiento en las simulaciones	107

RESUMEN

La demanda mundial por pulpa y papel, así como otros usos de la madera incrementaron la plantación de bosques con especies de rápido crecimiento, convirtiendo a las plantaciones de *Eucalyptus* desde la segunda mitad del S XX, en el principal cultivo para obtención de productos madereros. Como respuesta a esta demanda y con el incentivo de una política forestal orientada al desarrollo del sector, en Uruguay se generó un gran crecimiento de la superficie ocupada con forestación comercial lo cual ha instalado en nuestro país la controversia respecto a los efectos de este cambio de uso del suelo sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos, la degradación de los suelos, la reducción de la biodiversidad y afectación del paisaje, aspectos demográficos y socioculturales e incluso sobre la extranjerización de la tierra. Es así que la necesidad de profundizar la investigación vinculándola a las condiciones ambientales, climáticas y productivas locales está establecida.

El primer objetivo de este trabajo es describir y cuantificar el proceso de redistribución de la precipitación, causado por la presencia de plantaciones forestales en tierras tradicionalmente ocupadas con pasturas naturales para la cría de ganado, ubicadas en la región noroeste del Uruguay, logrando la obtención de herramientas adaptadas a las condiciones locales para la simulación de la redistribución de la precipitación. El segundo objetivo es utilizar las herramientas anteriores como insumo para su incorporación en la modelación hidrológica, lo cual posibilita predecir el impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos para diferentes escenarios de crecimiento del sector. La zona de estudio, se localiza en el departamento de Paysandú en la zona noroeste del Uruguay, donde en el año 2005 la Universidad de la República instrumentó y desde entonces monitorea dos microcuencas experimentales.

Para la modelación del proceso de redistribución de precipitación se tomaron como base los modelos de Rutter y Gash, analizando su desempeño adaptados a las condiciones locales, en particular en lo relativo a la densidad de plantación y características de la especie. Ambos modelos resultaron ser altamente sensibles a los parámetros estructurales que definen el almacenamiento y el coeficiente de atravesamiento libre del dosel (S y pd). El modelo de Gash se muestra además altamente sensible a la tasa media de evaporación y moderadamente sensible a la de precipitación, lo cual da una pauta de la incidencia que el cambio climático acompañado de elevación en la temperatura media y aumento en la intensidad de las precipitaciones tendría sobre esta componente del ciclo hidrológico.

La aplicación del modelo de Gash resultó en primer lugar en una modificación del módulo de estimación del escurrimiento fustal ya que el cálculo original sobreestima fuertemente los valores observados en las condiciones locales. Se obtuvo además resultados ligeramente superiores al introducir una segunda modificación en el cálculo de la resistencia aerodinámica con una formulación más general la cual se considera más apropiada en condiciones húmedas.

Por otro lado la implementación de la modificación del modelo de Rutter, permitió calibrar la relación de proporcionalidad entre el parámetro de almacenamiento del dosel forestal (S) y el índice de área foliar (IAF). Con esto se logra una forma de estimación del parámetro más relevante para los modelos de redistribución de la precipitación, que se independiza de la necesidad del monitoreo de

las componentes y lo sustituye por la estimación del IAF. Se implementó además una metodología para la estimación del IAF, aplicando el método de medición indirecta a través de la fotografía hemisférica del dosel. El método requiere de la adquisición de imágenes mediante un lente hemisférico adosado a una cámara fotográfica digital, que luego son procesadas mediante software de análisis de imágenes a partir de las cuales se estima la fracción de cielo visible y con ello finalmente el IAF.

El segundo objetivo del trabajo fue alcanzado mediante la implementación del modelo de Zhang et al (1999) para la estimación de la evapotranspiración en las microcuencas de estudio. En esta implementación se introdujo una modificación en el modelo original de Zhang, incorporando una componente debida a la intercepción de la precipitación, lográndose un muy buen ajuste y la calibración del parámetro del modelo de Zhang para ambas coberturas estudiadas.

Una segunda aplicación, más ambiciosa, consistió en la incorporación de los resultados de las componentes de la redistribución de precipitación y los parámetros estructurales del dosel forestal en la modelación hidrológica del tipo distribuido, lo cual posibilita predecir el impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos para diferentes escenarios de crecimiento del sector. El modelo SHETRAN fue calibrado con aceptable eficiencia en las dos microcuencas bajo estudio. A partir de estos resultados fue posible realizar la simulación de la forestación con *Eucalyptus* de una microcuenca y evaluar los efectos de este cambio de uso del suelo en la disponibilidad de los recursos hídricos.

Las perspectivas de trabajo futuro están centradas en primer lugar en la validación de todos los modelos implementados con datos observados en un mayor período de monitoreo que permita incluir un rango de condiciones más amplio, en particular en lo referente a la intensidad de los eventos de precipitación. En segundo lugar incorporar la variación temporal de los parámetros del dosel forestal, especialmente del almacenamiento y el IAF, con la edad de la plantación para lo cual es necesario el seguimiento de al menos un rodal durante su etapa de mayor crecimiento: entre el primer y el octavo año. A más largo plazo sería recomendable plantear modelaciones similares para la segunda especie exótica predominante en el Uruguay: *Pinus*.

PALABRAS CLAVE: intercepción, evapotranspiración, forestación con *Eucalyptus*.

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

A nivel mundial la explotación de los recursos naturales, en particular suelos y aguas, para la producción de alimentos y bienes aumenta constantemente con el crecimiento demográfico. Hacia 1945 la demanda mundial por pulpa y papel, así como otros usos de la madera incrementaron la plantación de bosques con especies de rápido crecimiento, convirtiendo las plantaciones de *Eucalyptus* en el principal cultivo para obtención de productos madereros, situación que se agudiza con la crisis energética de las últimas décadas (Paula Lima, 1984). Nuestro país como tradicional productor de bienes primarios respondió a estas demandas, que en un principio fueron extranjeras, con una política de promoción de los recursos forestales del país e incentivo del desarrollo de la forestación industrial que se concretó cuando en 1987 el gobierno uruguayo aprobó la ley N° 15.939.

Ya en 1981 la FAO incluía a Uruguay en un conjunto de 58 países donde estimaba que se desarrollaría la forestación extensiva de *Eucalyptus*: *“El eucalipto se ha convertido en la madera cultivada en el Uruguay más económica, abundante y más empleada.”*. *“...las introducciones de E. saligna y E. grandis demostraron un crecimiento superior, y es posible que se conviertan en las especies más importantes para futuras plantaciones industriales.”* (FAO, 1981). Efectivamente y como consecuencia de la política forestal mencionada, en Uruguay se generó un gran crecimiento de la superficie ocupada con forestación comercial principalmente *Eucalyptus* y *Pinus* que aumentó desde 45.000 hectáreas a fin de 1980 a casi 900.000 hectáreas a fines de 2010 (Figura 1.1), según el registro de la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.

De esta superficie el 77% se encuentra plantado en tierras declaradas de prioridad forestal (Petraglia y Dell’Acqua, 2006), las cuales representan según éstos autores 4,1 millones de hectáreas. Asumiendo que se mantuvo dicha proporción, se deduce que al año 2010 cerca del 20% de la superficie de tierras potenciales de prioridad forestal en Uruguay se encontraba ocupada por plantaciones comerciales.

Según datos de la DGF del MGAP se extrajeron en el último año casi 12 millones de m³ de madera en rollo, de los cuales el consumo de madera para pulpa de celulosa representó el 66%, siendo el combustible y el aserrío para chapas los restantes usos principales. El desempeño de la actividad forestal en el comercio exterior del Uruguay se ha modificado sustancialmente entre la década de 1990 y la actualidad, siendo que hasta el año 2000 la balanza comercial de productos de base forestal era deficitaria en nuestro país, situación que se revierte en forma estable a partir del año 2002. En el año 2010 las exportaciones alcanzaron los 571 millones de dólares, superando en 132% a las importaciones y representando el 7,1% de las exportaciones de bienes del país (Fuentes DGF-MGAP y Banco Central del Uruguay).

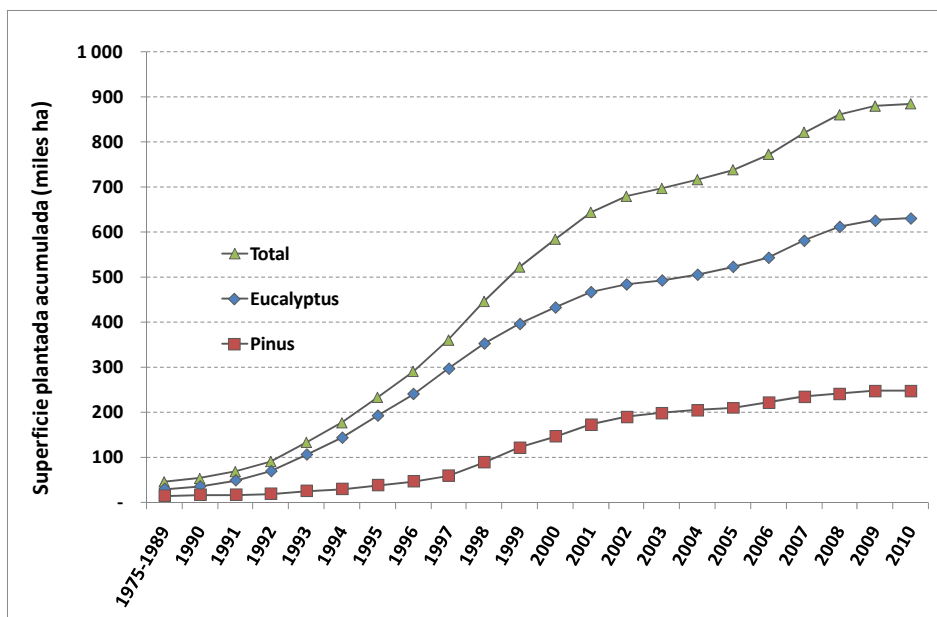


Figura 1.1 Evolución de la superficie forestada en Uruguay

Si bien la tasa de crecimiento de la superficie forestada ha sido variable en el período, más lenta en los años de la última crisis económica (2002 al 2004) y mayor en los años de crecimiento de la economía del país, parece válido considerar que el escenario futuro más probable es el de crecimiento con una tasa similar a la actual. Esto fundamentalmente debido a la existencia de una importante fábrica de pulpa de celulosa ubicada en el litoral oeste del país cuya demanda, cubierta en la actualidad exclusivamente con materia prima nacional, es creciente; así como también a la próxima construcción de otra planta de similares características en el sur oeste del país y la existencia de proyectos de inversión relacionados al sector junto con la permanente adquisición de tierras de prioridad forestal por parte de grandes empresas.

La percepción de que los bosques son necesariamente beneficiosos para el medio ambiente y los recursos hídricos, ha llevado a la creencia generalizada que relaciona la ausencia de bosques con degradación de los recursos hídricos y la presencia y fomento de estos con rehabilitación y conservación, según reseña Calder en su libro *Blue Revolution* (Calder, 2005). Esta creencia según dicho autor ha causado que gobiernos, agencias de desarrollo e incluso las Naciones Unidas asignen fondos a programas de forestación o reforestación justificándolos como la mejor forma de obtener beneficios ambientales e hidrológicos como la regulación hídrica, la reducción de la erosión, o la mejora de la calidad del agua, siendo que en muchos casos los citados beneficios pueden ser escasos, o producir efectos contrarios de no llevarse a cabo en un contexto de manejo integrado y de largo plazo de los recursos naturales (Calder, 2007).

Una percepción contraria pero igualmente simplista, es la que se ha generalizado en muchos ámbitos, sociales, políticos e incluso académicos de nuestro país, cuando se trata de la sustitución de las tradicionales pasturas de uso ganadero por plantaciones forestales. Desde que la forestación comercial con especies exóticas, en particular *Eucalyptus*, se ha convertido en el principal cambio de uso del suelo en nuestro país, la controversia respecto a sus efectos sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos, la degradación de los suelos, la reducción de la biodiversidad y afectación del paisaje, aspectos demográficos y socioculturales y hasta la extranjerización de la tierra está instalada.

Centrándonos en los aspectos vinculados a los recursos hídricos, algunos planteos indican:

“No hay razones para presuponer que la forestación con eucaliptus conduce a un agotamiento del recurso agua.” (Martino et al., 1997)

“Para abastecer a las dos plantas de celulosa que se pretenden instalar en el departamento de Río Negro, son necesarias 300.000 hectáreas forestadas,...”. “...el consumo anual de dicha superficie sería equivalente a 4500 días (12,3 años) del consumo máximo del área metropolitana de Montevideo.” (Panario et al., 2006. Informe de la Facultad de Ciencias, UdelaR, en base a datos de consumo tomados de Lima (1993) en el estado de San Pablo, Brasil)

“...es muy conocida la avidez por el agua de este género forestal, y su efecto de “desección” de las tierras linderas a las plantaciones, de los reservorios de agua si se encuentran en sus bordes, y de las napas subterráneas subsuperficiales.” (Pérez Arrarte, 2007)

“El movimiento de chacreros de Soriano denunció que el crecimiento de la forestación ha generado problemas en el abastecimiento de agua de la zona. Se refieren concretamente a la expansión de los eucaliptos, que absorben grandes cantidades de líquidos del suelo.” (Diario La República, 03.02.2007).

“Desde el punto de vista fisiológico el *Eucalyptus* es una especie forestal perfectamente normal, en términos del consumo de agua....que incluso demuestra mayor eficiencia en el uso del agua que otras especies” (traducido de Lima, 2008)

“Este impacto se relaciona, considero yo, con densidades excesivas de árboles y diseños de drenaje en las plantaciones que son inadecuados para las condiciones hidro-climatológicas del país.” “...este problema sería subsanable agregando estructuras artificiales de recarga en las cabeceras permeables de las cuencas en número suficiente para compensar las pérdidas por evaporación. De modo que, por lo menos desde el punto de vista hídrico, las plantaciones pueden tener un impacto claramente positivo, si se diseñan apropiadamente.” (Ing. Agr. Danilo Antón, columna de opinión en el portal depolitica.com.uy).

“...tomar un área de campo y plantar árboles, es arruinar el departamento donde somos productores de alimentos y además tenemos una reserva de agua muy importante y acá lo que va a faltar en el futuro son alimentos y agua. Y cada eucalipto le lleva 200 litros de agua por día” (declaraciones del Intendente de Colonia Walter Zimmer al Semanario El Eco de Carmelo, 27.10.2010).

“El problema con los daños ambientales es que los daños se ven a largo plazo, no se ven inmediatamente. Sin embargo nosotros estamos presenciando daños, incluso desde esferas de las propias autoridades se están marcando esos daños. Los daños de la forestación los estamos viendo, la pérdida de agua en muchas partes del territorio lo estamos viendo, la llegada de algunas plagas impensables como ocurrió en algún momento con los famosos murciélagos con rabia que se movían a través de la forestación también las hemos visto.” (Fiscal Enrique Viana, entrevista de Efraín Chury Iribarne CX 36, Radio Centenario, 28.06.2011).

Sin duda los cambios de uso en el suelo, debido principalmente a la repercusión que tienen sobre la evapotranspiración, afectan en forma importante tanto la disponibilidad como la distribución temporal de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Estos efectos si bien son conocidos y han sido ampliamente discutidos (Calder, 1992; Andréassian, 2004; van Dijk y Keenan, 2007), no son simples de predecir debido a que la superposición con otros factores como el clima y el efecto de escala los hacen difíciles de aislar para su estudio particular. Es por esto que más allá de opiniones o percepciones la necesidad de profundizar la investigación vinculándola a las condiciones ambientales, climáticas y productivas locales está establecida.

La línea de investigación relacionada a la Hidrología Forestal se desarrolla desde hace 10 años en el IMFIA, durante ese tiempo se ha avanzado en el conocimiento de la afectación que implica la forestación sobre los procesos hidrológicos generando indicadores que permiten cuantificar dichos efectos en comparación con el uso productivo tradicional del suelo uruguayo: pasturas y ganadería extensiva. En el marco de esa línea de investigación se desarrolla esta Tesis que pretende profundizar en el análisis de los modelos de redistribución de precipitación, su calibración y validación local para una posterior incorporación en la modelación hidrológica de tipo distribuido como otro paso que permita avanzar hacia el desarrollo de herramientas que posibiliten predecir el impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos para diferentes escenarios de crecimiento del sector.

Las actividades de investigación, se iniciaron en el año 2000, con el convenio PRENADER “Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con eucaliptos en el Uruguay”. Luego entre los años 2002 a 2004 se llevó a cabo el proyecto CSIC I+D “Impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos. ¿Cómo extender la información de microcuencas experimentales a grandes cuencas?”. En el marco de este proyecto y también con financiación del PDT a través del SPII, cooperación bilateral con Chile se desarrolló un intenso intercambio con investigadores de la Universidad Austral de Chile (UACH), a raíz del cual el grupo de investigación uruguayo profundizó el estudio de los procesos de

redistribución de la precipitación en plantaciones forestales. Entre los años 2005 y 2007 se continuaron las investigaciones relativas al proceso de redistribución de precipitación, en el marco de los proyectos CSIC I+D “Monitoreo y modelación hidrológica de la redistribución de la precipitación en plantaciones forestales”.

Entre los años 2005 y 2007 el equipo de investigación del IMFIA ejecutó el proyecto PDT 32/03 “Indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable de las plantaciones de eucaliptos en el Uruguay”, el cual ha tenido continuidad con el proyecto INIA FPTA 210 “Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo” ejecutado entre marzo de 2007 y junio de 2010. Con estos proyectos se estableció un programa de monitoreo que involucra microcuencas experimentales hidrológicamente similares utilizadas para comparar efectos del uso y manejo del suelo sobre los procesos hidrológicos. Las actividades de investigación desarrolladas en estos proyectos incluyeron el trabajo con modelos hidrológicos y la determinación de indicadores hidrológicos de efectos de la forestación sobre los recursos hídricos, es fundamentalmente en el marco de estos dos últimos proyectos que se desarrollan los trabajos que se profundizan en esta Tesis de Maestría.

1.2 Efectos de la forestación sobre los procesos hidrológicos

La cobertura vegetal, también denominada uso del suelo es un factor clave en el ciclo hidrológico debido a los efectos del dosel y los sistemas radiculares en la intercepción de la precipitación, la infiltración, percolación, la rugosidad superficial, la transpiración y la escorrentía. Aussenac y Boulangeat (1980) señalan que las influencias de los bosques sobre el ciclo hídrico son complejas y variables según el tipo de clima, ya sea que se trate de bosques nativos o plantaciones comerciales. Cuando se produce una precipitación sobre un bosque, una fracción del agua es interceptada y temporalmente retenida en el follaje y las ramas (hojas y pequeñas ramas) antes que alcance la superficie del suelo, parte de esa fracción es reintegrada a la atmósfera por evaporación, otra parte gotea directamente hacia el suelo y la última escurre hacia el suelo por las ramas y troncos (Paula Lima, 2008) configurando el proceso conocido como redistribución de la precipitación. La fracción de la precipitación que alcanza el suelo también es controlada por la vegetación que en función de su mayor rugosidad superficial reduce la velocidad de escurrimiento superficial (Lopez y Blanco, 1978). Finalmente y en términos generales, los árboles disponen de mayor cantidad de agua en el suelo debido al desarrollo de su sistema radicular, lo que reporta en una mayor evapotranspiración respecto a coberturas vegetales bajas (Calder, 1992).

En todo el mundo se han estudiado los efectos de los cambios de uso del suelo sobre los recursos hídricos, en particular los generados por la forestación y deforestación, al interactuar con los principales procesos hidrológicos: evaporación, erosión, infiltración y escurrimiento. En 1858 monitoreos en cuencas con distinta ocupación forestal llevados a cabo por Jeandel, Cantégril y Bellaud concluían que la cobertura forestal podía enlentecer el escurrimiento en eventos de tormenta, mientras que Matthieu en 1867 iniciaba uno de los primeros monitoreos documentados para el estudio de la intercepción en bosques (Andréassian, 2004). Ya en 1958 la experiencia del Ingeniero inglés Frank Law (Law, 1958) establecía, a nivel de parcelas experimentales, la reducción de la escorrentía debido a la forestación de pasturas.

Las modificaciones de la relación precipitación-escurrimiento debidas a la forestación y deforestación han sido estudiadas extensamente a nivel de microcuencas (Bosch and Hewlett, 1982; Scott and Lesch, 1997; Gush et al., 2002; Andréassian, 2004; Iroumé et al., 2006). En su revisión de 94 estudios de cuencas relativos al efecto del cambio de vegetación sobre el escurrimiento anual, Bosch & Hewlett (1982) concluyen para *Pinus* y *Eucalyptus* la disminución del escurrimiento medio anual es 40 mm por cada 10% de aumento en la forestación. Reducciones en el escurrimiento reportadas en estudios de cuenca en Sudáfrica alcanzan el 100% del flujo base luego de nueve años de la forestación con *Eucalyptus* (Scott y Lesch, 1997) retornando éste recién cinco años después de la deforestación completa de la cuenca. Por su parte Silveira y Alonso (2009) con estudios realizados en una cuenca de 2000 km² en Uruguay, muestran tendencias de reducción de la escorrentía entre los períodos pre-forestación y pos-forestación para la misma cuenca. Los resultados de este estudio muestran una reducción estadísticamente significativa en los volúmenes escurridos (33-43%) y los caudales pico (59-65%) a nivel de eventos. Mientras que para escurrimientos anuales y estacionales también se comprueban tendencias de disminución debidas al desarrollo forestal. El escurrimiento

anual decrece entre 8.2 y 36.5% dependiendo de la precipitación anual, la reducción es mayor durante la primavera y el verano (25.2-38.4%) y menor durante otoño invierno (15-20.3%). Por su parte Iroumé et al. (2006) los analiza estudiando los períodos pre y post cosecha en una cuenca y comparando cuencas adyacentes bajo distintas condiciones de forestación, encontrando incrementos de 32% en los caudales pico a nivel de eventos y de 110% en el escurrimiento medio anual luego de la cosecha.

Existe clara coincidencia en señalar que la forestación de pasturas reduce el escurrimiento debido al aumento de la evaporación causado por la intercepción de la cubierta forestal y bajo distintas condiciones y manejos de la plantación (Rutter et al., 1971; Gash et al., 1980; Calder et al., 1993 y 1997; Valente et al., 1997; Huber e Iroumé, 2001; Iroumé et al., 2006; Silveira y Alonso, 2009). Investigadores chilenos han reportado numerosos estudios sobre los efectos hidrológicos asociados a las plantaciones forestales. Huber et al. (1998) e Iroumé y Huber (2002) analizaron las pérdidas por intercepción y las relacionaron a la precipitación y a las características de la plantación (especie, densidad, edad).

Por otra parte los efectos sobre el proceso de percolación y recarga de acuíferos son fuertemente dependientes de las condiciones locales, en particular clima, tipo y profundidad de los suelos, capacidad de almacenamiento del acuífero (Calder, 2005) y manejo de la plantación (Paula Lima, 2008). En esta línea Huber y López (1993) y Huber et al. (1998) indicaron los aumentos en el contenido de agua del suelo y la disminución de la percolación bajo plantaciones forestales en comparación a las pasturas, con suelos profundos de la región sur de Chile y precipitaciones anuales cercanas a 2000 mm concentradas en el período abril-octubre (otoño – invierno). En contraste Silveira et al. (2010a) reportan mayores recargas a la napa freática bajo plantación forestal en comparación con las pasturas, para suelos poco profundos del noroeste de Uruguay y con precipitaciones del orden de 1300 mm distribuidas en el año.

Finalmente y a modo de resumen de lo planteado, resulta ilustrativo tomar del trabajo de Calder (2005), sus principales conclusiones respecto a los que él llama los “mitos y postulados” en relación a los bosques y el agua:

Aumento de las precipitaciones: Las evidencias de mediciones de campo y modelación sugieren que si bien los efectos de los bosques en la precipitación probablemente sean pequeños, no pueden ser completamente descartados. Es necesaria investigación complementaria para determinar la magnitud de este efecto, así como para investigar los efectos de otros cambios de uso del suelo como el riego, que también alteren los flujos suelo-atmósfera.

Aumento del escurrimiento: Aún con algunas excepciones los estudios a nivel de cuencas generalmente indican la reducción del escurrimiento en áreas forestadas en comparación con áreas de vegetación corta.

Regulación del escurrimiento: Existe un rango de efectos desde una reducción significativa del flujo base en plantaciones forestales comparadas con otras coberturas, hasta la ausencia de cambios al talar un bosque indígena. Las características geológicas vinculadas al almacenamiento de agua subterránea pueden ser un factor crítico que determine la

respuesta del flujo base a cambios en la vegetación. No existe evidencia del llamado “efecto esponja” por el cual se argumenta que los bosques almacenan el agua que no escurre durante los eventos para luego “devolverla” durante los períodos secos. La evidencia indica que es más probable que la forestación reduzca los escurrimientos en períodos secos.

Reducción de las inundaciones: La evidencia científica muestra que a medida que aumenta la severidad de la inundación se reducen los beneficios de la cobertura forestal, si bien las altas tasas de infiltración bajo bosques naturales reducen el escurrimiento superficial y con ello los efectos de la inundación.

Nuevamente y con base en los rangos de variación documentados en las investigaciones reseñadas, se evidencia que la magnitud, e incluso el sentido directo o inverso, de los efectos de la forestación sobre los principales procesos hidrológicos depende fuertemente de las condiciones locales.

1.3 Objetivos y metodología

El objetivo principal de este trabajo es describir y cuantificar el proceso de redistribución de la precipitación, causado por la presencia de plantaciones forestales en tierras tradicionalmente ocupadas con pasturas naturales para la cría de ganado, ubicadas en la región noroeste del Uruguay, logrando la obtención de herramientas adaptadas a las condiciones locales para la simulación de la redistribución de la precipitación. El cumplimiento de éste se obtendrá mediante: i) el análisis de información meteorológica monitoreada durante el período junio/2006 – diciembre/2009; ii) la evaluación del desempeño de los modelos de Rutter y Gash en las condiciones locales; iii) la evaluación de la incidencia de factores clave como la evaporación y el índice de área foliar en el proceso de redistribución.

La metodología de trabajo comprende en primer lugar una revisión del estado del arte en lo que respecta a los efectos producidos por la forestación sobre los principales procesos del ciclo hidrológico (Capítulo 1), que luego se profundiza en los aspectos vinculados a la interceptación de la precipitación por el dosel forestal (Capítulo 2).

La zona de estudio, caracterizada en el Capítulo 3, se localiza en el departamento de Paysandú en la zona noroeste del Uruguay, donde en el año 2005 la Universidad de la República instrumentó y desde entonces monitorea dos microcuencas experimentales, de entre 1 y 2 km² de superficie: Don Tomás y La Cantera, ambas pertenecen a la cuenca del Río Queguay.

Para la modelación del proceso de redistribución de precipitación se tomaron como base los modelos de Rutter y Gash que se describen en el Capítulo 2, originalmente formulados a mediados de 1970 y ampliamente reportados en la bibliografía de referencia. En particular se incorporan modificaciones de estos modelos, que los hacen aplicables a las características de la forestación comercial en Uruguay representando las condiciones de baja densidad. Dichas modificaciones incorporan en los modelos la dependencia de sus parámetros originales con el índice de área foliar (IAF) y la determinación indirecta de éste con la técnica de la fotografía hemisférica del dosel, cuya metodología y resultados se describen en el Capítulo 4.

Los resultados de la implementación de los modelos de Rutter y Gash, así como los procedimientos efectuados para su calibración y validación se presentan en el Capítulo 5, donde se incluye también el análisis de sensibilidad de ambos modelos a la variación de sus principales parámetros.

En segundo lugar el trabajo realizado tiene como objetivo incorporar las herramientas anteriores como insumo en la modelación hidrológica, lo cual posibilita predecir el impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos para diferentes escenarios de crecimiento del sector. Los avances logrados en este sentido, a partir de la implementación del modelo de Zhang y del modelo hidrológico SHETRAN en las dos microcuencas del área de estudio, se presentan en el Capítulo 5 y el Capítulo 8, respectivamente.

CAPÍTULO 2 - LA INTERCEPCIÓN DEL DOSEL FORESTAL

2 LA INTERCEPCIÓN DEL DOSEL FORESTAL

En este capítulo se presenta el marco teórico del proceso de intercepción del dosel forestal, comenzando por el proceso de evaporación, describiendo el proceso de redistribución de la precipitación para alcanzar finalmente la comprensión de los modelos clásicos de redistribución: Rutter y Gash, y sus modificaciones las cuales son objeto de estudio en esta Tesis.

2.1 Evaporación

La evaporación constituye uno de los procesos del ciclo hidrológico, mediante el cual el agua existente en la superficie de la tierra y el océano es devuelta a la atmósfera en forma de vapor de agua. El agua presente en el suelo se evapora directamente o a través de las estomas de la vegetación mediante la transpiración. La integración de la evaporación directa con la transpiración es el proceso que se define como evapotranspiración. Este proceso está influido por el suministro de energía para proveer el calor latente de vaporización; por la capacidad de transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación y por el suministro de humedad desde la superficie de evaporación (Chow et al, 1994).

En particular la modelación del proceso de redistribución de la precipitación en plantaciones forestales es muy sensible a la estimación de la evaporación del agua retenida en el dosel forestal (Lankreijer et al, 1993; Wallace y McJannet, 2006; Limousin et al., 2008; Shi et al., 2010) y en la estimación de ésta juega un rol preponderante la resistencia aerodinámica del dosel.

2.1.1 Evapotranspiración en bosques

En términos prácticos la evapotranspiración corresponde a la suma de las pérdidas por intercepción, transpiración y evaporación desde el suelo (Figura 2.1), y ocurre entre un límite mínimo, en condiciones secas, impuesto por la disponibilidad de agua (precipitación y agua disponible por la vegetación) y un límite máximo, en condiciones de humedad, dado por la energía disponible (radiación neta y advección). La ocurrencia de la evapotranspiración entre éstos límites y la importancia relativa de los tres procesos que la conforman se deben al tipo y condiciones de la vegetación, las condiciones del suelo y al clima. A escala de cuenca la influencia de estos factores debe considerarse junto con su variación espacial y los factores topográficos (Calder, 2005; Zhang, 1999).

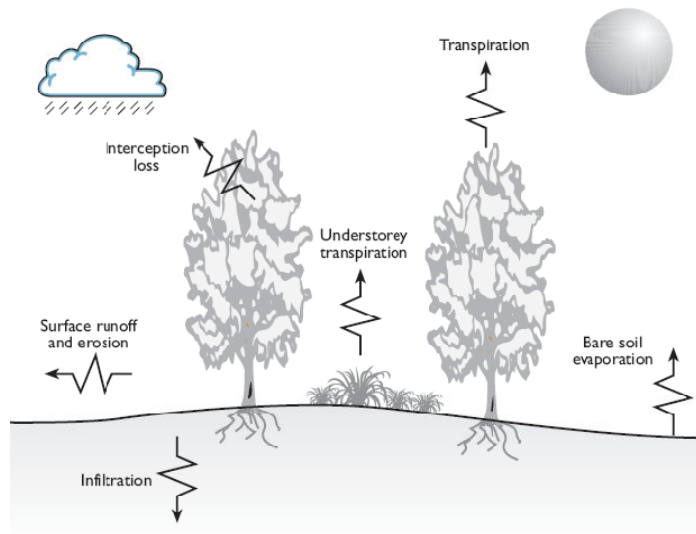


Figura 2.1 Principales caminos de evaporación [tomado de Calder, 2005]

La mayor evaporación de agua de los bosques frente a la vegetación corta o a los cultivos anuales se debe según Calder (1992) y Paula Lima (2008) principalmente a dos procesos: la alta tasa de evaporación en condiciones de humedad (intercepción) dada por una capacidad mayor de almacenamiento y la mayor rugosidad aerodinámica de los bosques frente a pasturas o cultivos bajos; y mayores tasas de transpiración debido a sus sistemas radiculares más profundos con los cuales los bosques alcanzan una mayor disponibilidad de agua. Un tercer proceso que incide en la regulación de la evapotranspiración de los bosques es el contenido de agua disponible en los suelos para la transpiración debido a la cantidad de agua que efectivamente alcanza el suelo, en función de la redistribución de la precipitación.

Tomando las consideraciones mencionadas Zhang et al. (1999) desarrollan un modelo de estimación de la evapotranspiración media anual (ET) basado en sus principales factores de variación: la precipitación, la evapotranspiración potencial y la disponibilidad de agua para la vegetación

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + w \frac{E_0}{P}}{1 + w \frac{E_0}{P} + \left(\frac{E_0}{P}\right)^{-1}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde ET es la evapotranspiración media anual; E_0 es la evapotranspiración potencial y w es el coeficiente de disponibilidad de agua para la planta y representa la capacidad de esa vegetación en particular para almacenar agua en la zona radicular para su transpiración. El coeficiente w según Zhang debe variar entre 0,5 y 2,0 correspondiendo éstos límites a pasturas cortas y bosques respectivamente y asigna un valor de 0,1 correspondiente al suelo desnudo.

Con esa base los autores proponen un modelo de aplicación simple para el cálculo de la evapotranspiración en términos de balance hídrico de largo plazo a escala de cuenca. Dicho modelo asume que la ET anual de una cuenca con dos tipos de vegetación (pastura y forestación) puede expresarse como la suma de las ET anuales correspondiente a cada cobertura, ponderadas por el área de cobertura de cada una:

$$ET = f \cdot ET_f + (1 - f) \cdot ET_p \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde f es la cobertura de la forestación (en porcentaje del área de la cuenca); ET_f es la evapotranspiración del bosque y ET_p la de la pastura.

En particular los estudios de Zhang et al. (1999, 2001), utilizan resultados de 250 cuencas para desarrollar relaciones entre precipitación anual media y evapotranspiración para bosques y pasturas. Sus observaciones indican que la evapotranspiración real (ETR) de los bosques es generalmente mayor que la de las pasturas. La Figura 3.2 muestra la relación entre la precipitación anual, el tipo de vegetación y la ETR.

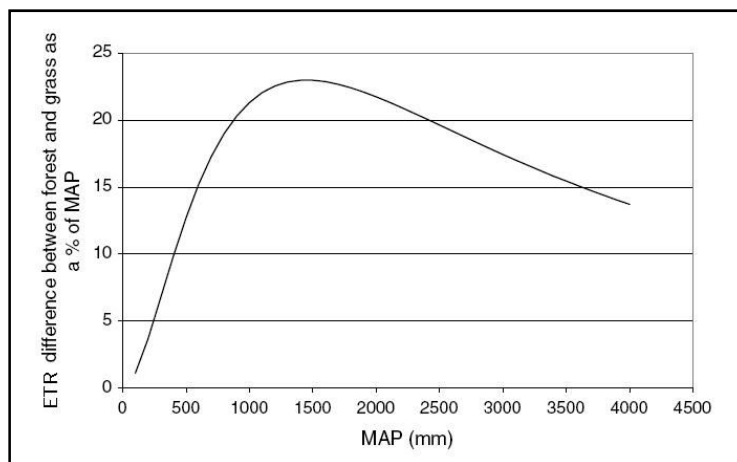


Figura 2.2 Diferencia de ETR entre bosques y pasturas como porcentaje de la precipitación media anual (en inglés MAP), [tomada de Peel et al, 2002].

Se observa que para bajas precipitaciones (≈ 300 mm) existe poca diferencia en la evapotranspiración entre bosques y pasturas debido a que ambas son capaces de utilizar la precipitación disponible. Al aumentar la precipitación las diferencias entre ambas coberturas se incrementan ya que los bosques utilizan más agua que la pastura debido a su mayor productividad y profundidad radicular. La máxima diferencia ocurre cerca de los 1500 mm de precipitación, luego de los cuales las diferencias decrecen.

2.1.2 Estimación de la evaporación en el dosel

La evapotranspiración potencial es la que puede ocurrir desde una superficie bien cubierta de vegetación cuando el suministro de humedad es ilimitado y se puede estimar teóricamente en forma similar a la que se aplica para la evaporación desde una superficie libre, utilizando el método combinado sugerido por Penmann (1948) basado en el balance de energía y el transporte aerodinámico, a partir de información meteorológica estándar. Mediante la incorporación de dos términos, la resistencia estomática y la resistencia aerodinámica, Monteith (1965) desarrolló una metodología para la estimación de la evaporación desde cualquier superficie, ya sea que este cubierta con vegetación alta o baja y que tenga o no limitación en la disponibilidad de agua. La ecuación de Penman-Monteith puede expresarse como:

$$E_p(mm/día) = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta_e}{r_a}}{\lambda \left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Dónde Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación [$kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$]; γ es la constante psicrométrica [$kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$]; R_n es la radiación neta [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]; G es el flujo de calor en el suelo [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]; ρ es la densidad del aire [$kg \text{ m}^{-3}$]; c_p es el calor específico del aire [$MJ \text{ kg}^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$]; δ_e es el déficit de presión de vapor [kPa]; λ es el calor latente de vaporización [$MJ \text{ kg}^{-1}$]; r_s es la resistencia de la superficie [$s \text{ m}^{-1}$] y r_a es la resistencia aerodinámica [$s \text{ m}^{-1}$], función de la longitud de rugosidad.

Quando se estudia la evaporación del agua interceptada desde un dosel saturado y se puede considerar entonces nula la resistencia del dosel, la ecuación se transforma en:

$$E_p(mm/día) = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta_e}{r_a}}{\lambda \cdot (\Delta + \gamma)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

La resistencia aerodinámica usualmente se obtiene a partir del perfil de velocidades de viento sobre el bosque con la expresión (Rutter et al., 1971):

$$r_a[s/m] = \frac{1}{k^2 u_z} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde k es la constante de von Karman [0,41]; z es la altura a la que se mide la velocidad del viento [m]; d es la altura del plano de desplazamiento nulo [m]; z_0 longitud de la rugosidad para la transferencia de momentum [m]; u_z es la velocidad de viento a la altura z .

De no disponer de mediciones locales del perfil de velocidad del viento d y z_0 deben ser estimados y en general las relaciones propuestas son estimaciones a partir de la altura promedio de los árboles H . Rutter et al. (1971) proponen las relaciones $z_0=0,1.H$ y $d=0,75.H$, que son las utilizadas en la generalidad de los estudios de intercepción (Lloyd et al., 1988; Valente et al., 1997; Holwerda et al., 2007); mientras que Shuttleworth (1989) utiliza $z_0=0,076.H$.

Wieringa (1992 y 1993) reporta estudios que indican la dependencia de z_0 y d con la altura, densidad y distribución en superficie de los elementos, y destaca el consenso existente respecto al fuerte incremento de la relación z_0/H con la densidad de los obstáculos hasta un máximo de cobertura de entre 5 y 20% luego del cual la relación decrece nuevamente. Respecto al parámetro d , Wieringa plantea que la relación d/H crece con el aumento de la densidad, con valores de entre 0,64 para cultivos y 0,75 para bosques. Los estudios reportados por este autor muestran valores de referencia para los parámetros que se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Rugosidad en superficies con vegetación alta, [tomado de Wieringa, 1992 y 1993].

Superficie	H	Z0	d	Autor de referencia
Bosque de pino	11,8±1,6	1,0±0,3	9,6	Leonard y Federer (1973)
	15,4	1,0	12	Thompson (1979)
	18,5	1,3	12,7	De Bruin y Moore (1985)
	10±1	1,0	7	Gash (1986)
Bosque de pino maduro		0,8 – 1,6		Bergen (1987)
Bosque tropical		1,7 – 2,3		

Abtew et al (1989) presentan una estimación de los parámetros de la rugosidad aerodinámica en función de la geometría y cobertura de los elementos que conforman la rugosidad, según los autores la estimación es válida en general para un amplio rango de alturas y en particular para árboles de hasta 20 m de altura:

$$d = 0,85.Fc.H$$

$$z_0 = 0,13.(H - d)$$

Ecuación 2.6

Siendo: F_c la fracción de la superficie total cubierta por los elementos rugosos.

En la mayoría de los modelos de intercepción la resistencia aerodinámica se aproxima como en Rutter et al. (1971) por la transferencia de *momentum*, Lankreijer et al (1993) plantean que la evaporación del agua interceptada puede estimarse mediante una formulación más general que considera la resistencia aerodinámica a la transferencia de calor:

$$r_{a,H} [s / m] = \frac{1}{k^2 u_z} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0,M}} \right) \right] \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0,H}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde $z_{0,H}$ es la longitud de la rugosidad para la transferencia de calor [m]; $z_{0,M}$ longitud de la rugosidad para la transferencia de momentum [m] y los restantes parámetros son como en Ec. 2.5.

La diferencia entre ambas longitudes de rugosidad surge según Lankreijer et al (1993) de sus distintos mecanismos de transferencia y resulta especialmente importante en condiciones húmedas. Las estimaciones posibles de $z_{0,M}$ ya fueron planteadas, mientras que para estimar $z_{0,H}$ dichos autores proponen la relación:

$$\ln \left(\frac{z_{0,M}}{z_{0,H}} \right) = 2 \quad \Rightarrow \quad z_{0,H} = 0.14 z_{0,M} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

2.2 Redistribución de la precipitación

La redistribución de la precipitación es un proceso complejo que depende de múltiples factores, éstos se relacionan por un lado con las características estructurales del dosel: superficie de las hojas, forma, densidad, etc., y por otro con las variables meteorológicas locales: radiación, temperatura, humedad relativa, viento, intensidad y frecuencia de la precipitación.

La cubierta vegetal controla la acción y el movimiento del agua que precipita (P) mediante la redistribución de la precipitación, un proceso hidrológico fundamental particularmente en cuencas forestadas. Este proceso según describen la mayoría de los textos básicos (Paula Lima, 2008), comienza por un retraso en la llegada del agua al suelo, las gotas quedan retenidas en la estructura de la cubierta vegetal (hojas y ramas pequeñas) hasta que esta alcanza su saturación o capacidad de almacenamiento. Esta capacidad de almacenamiento es función del tamaño, composición y configuración de cada hoja; de la viscosidad del agua (en función de la temperatura) y de forzantes externos como la intensidad de la precipitación y el viento. Aspectos que operando en conjunto definen la tensión superficial entre la superficie foliar y el agua sobre ella.

Al alcanzar el punto en que la gravedad supera la tensión superficial, comienza el goteo desde el dosel al suelo conformando junto con la precipitación que logra atravesar el dosel y alcanzar directamente el suelo la precipitación directa (P_D). En paralelo otra fracción que no es retenida en el dosel escurre por las ramas llega al tronco y alcanza el suelo configurando el escurrimiento o precipitación fustal (P_F). La suma de estas dos componentes es la precipitación neta (P_N) que será la que, alcanzando el suelo, quede a disposición de la vegetación. La diferencia entre la precipitación total incidente y la precipitación neta se denomina intercepción (I) la cual constituye la suma del agua que queda almacenada en la cubierta vegetal y la que se evapora desde ésta. Lo planteado se expresa como (Huber e Iroumé, 2001):

$$I = P - P_N \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Y por lo tanto

$$I = P - (P_D + P_F) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

De una primera revisión presentada por Zinke (1967) surge que las pérdidas por intercepción se encuentran entre el 20 y el 40% de la precipitación incidente para coníferas y entre 10 y 20% en bosques de madera dura, otros estudios presentan valores extremos de 9% en bosques tropicales Amazónicos de Brasil (Lloyd et al., 1988) y hasta 60% en *Picea sitchensis* y *Picea abies* de Francia (David et al., 2006). La revisión hecha por Zhang (1999) presenta valores de intercepción para *Eucalyptus* entre 8,3 y 23,3% y para *Pinus* entre 19,1 y 38,1% de la precipitación total incidente. En coincidencia las revisiones de Paula Lima (2008) indican mayores intercepciones en coníferas que en latifoliadas.

Los resultados obtenidos en Uruguay en el marco de las investigaciones realizadas por la Universidad de la República muestran valores de intercepción para *Eucalyptus* de entre 5,3 y 21% de la precipitación incidente (Silveira et al. en prensa), valores que muestran coherencia con lo reseñado en términos generales en la bibliografía citada.

Sin embargo la comparación se dificulta al intentar contrastar resultados teniendo en cuenta además de la especie, las características del bosque (densidad y edad) y clima local. Silveira (en prensa) presentan valores de intercepción medios del 17% de la precipitación total incidente, correspondientes a una plantación de *Eucalyptus globulus* de 8 años de edad en el litoral oeste del Uruguay donde la precipitación anual media es de 1250 mm. Valente et al. (1997) estudiaron la intercepción del dosel en plantaciones de *Eucalyptus globulus*, con un IAF de 3,2 y en una región de Portugal cuya precipitación media anual alcanza los 800 mm, encontrando valores de 10,8% de la precipitación incidente, valor ligeramente menor al 11,4% reportado para la misma especie y similar IAF (1-3) por Crockford y Richardson (1990) en el sur-este de Australia con una precipitación media de 650 mm. También la edad de la plantación influye considerablemente incrementando las pérdidas con la edad de la plantación (Paula Lima, 2008). Estimaciones de intercepción en una plantación de varias especies de *Eucalyptus* entre 5 y 6 años de edad, con bajos valores de IAF estudiadas por Greenwood et al. (1982), muestran resultados de entre 16,2% y 36,8% para la misma precipitación media anual. Pook y Moore (1991) reportan estudios en el sur-este de New South Wales, Australia con una precipitación media de 1300 mm dónde las pérdidas por intercepción en bosques de *Eucalyptus viminalis* apenas alcanzaron el 8,3%, mientras que en la zona central de Chile con precipitación media anual de 1540 mm, Huber e Iroumé (2001) reportan pérdidas por intercepción de entre 25% y 32% para *Eucalyptus* de 8 años de edad.

En definitiva se concluye que, al igual que observan Crockford y Richardson (2000), es sumamente complejo establecer valores genéricos de intercepción para una especie, edad y clima determinado ya que como se ve, el proceso depende fuertemente de las características del bosque: especie, edad, IAF; de las características de la precipitación: principalmente intensidad y duración, además de otras variables meteorológicas que influyen principalmente en la evaporación desde el dosel, en particular las relativas a la capacidad de transporte del vapor.

En la Tabla 2.2 se presenta a modo comparativo un resumen de éstos y otros resultados de intercepción (tomados de Zhang et al. 1999; Paula Lima, 1984 y Calder 1986) para la especie *Eucalyptus*.

Tabla 2.2 Comparación de la fracción interceptada por *Eucalyptus*.

Especie	Ubicación	Precipitación anual (mm)	Intercepción (% de P)	Referencia
<i>Eucalyptus</i>	Australia	1300	8,3	Pook et al. (1991)
<i>E. camaldulensis</i>	Israel	700	15	Karschon and Heth (1967)
<i>E. camaldulensis</i>			14,3	Heth y Karschon (1963)
<i>E. globulus</i>	India	1150	22	Samraj et al. (1982)
<i>E. globulus</i>	Uruguay	1250	5,3 - 21	Silveira (en prensa)
<i>E. globulus</i>	Australia	650	11,4	Crockford y Richardson (1990)
<i>E. globulus</i>	Portugal	800	10,8	Valente et al. (1997)
<i>E. hybrid</i>	India	1670	12	George (1978)
<i>E. melanophloia</i>			11	Prebble y Stirk (1980)
<i>E. melanophloia</i>			10,6	Smith (1974)
<i>E. nitens</i>	Chile	1540	25 - 32	Huber e Iroumé (2001)
<i>E. obliqua</i>	Australia	1200	15,0	Feller (1981)
<i>E. regnans</i>			23,3	Langford y O'Shaughnessy
<i>E. regnans</i>			22 – 26	Brookes y Turner (1964)
<i>E. regnans</i>	Australia	1660	19	Feller (1981)
<i>E. regnans</i>	Lidsdale, N.S.W.	810	11	Smith (1974)
<i>E. regnans</i> (40 años)			18,7	Duncan et al. (1978)
<i>E. regnans</i> (adulto)			23,2	Duncan et al. (1978)
<i>E. rossii</i>			10,6	Smith (1974)
<i>E. signata</i>			22	Westman (1978)
<i>E. umbra</i>			22	Westman (1978)

Las consideraciones expuestas sustentan la necesidad de implementar y mantener programas de monitoreo locales, extendidos en el tiempo para representar la variabilidad climática y distribuidos en el territorio para abarcar la variedad de especies y densidades de plantación usuales en el manejo forestal comercial y avanzar hacia la modelación del proceso en la cual se tome en consideración los parámetros a los que el proceso resulta más sensible.

Los primeros modelos de intercepción reseñados en Chang (2006) presentaban relaciones empíricas de correspondencia lineal con la precipitación incidente (Helvey, 1967; Linslet et al., 1975) donde los coeficientes de regresión comenzaban a relacionarse con la capacidad de almacenamiento del dosel y la evaporación del agua retenida. Rutter et al. (1971) establecieron las bases de la modelación física del proceso de redistribución formulando un balance de masa que considera los procesos de almacenamiento, drenaje y evaporación del dosel, posteriormente Rutter et al. (1975) incorporaron en la versión definitiva un módulo de escurrimiento fustal. Dicho modelo fue retomado y reformulado por Gash (1979) que a través de relaciones de regresión alcanza una solución analítica simplificada para el modelo de Rutter. Posteriormente Gash et al. (1995) y Valente et al. (1997) presentaron modificaciones para dosel ralo de los modelos de Gash y Rutter respectivamente que resuelven además pequeñas inconsistencias en el cálculo de los modelos originales.

Muzylo et al. (2009) reseñan quince modelos de base física para la intercepción de la precipitación que manejan entre 2 y 16 parámetros, la gran mayoría se relacionan con los modelos originales de Rutter y Gash o sus modificaciones, en el sentido que resuelven la redistribución de la precipitación a través del balance de masa, ya sea con el enfoque de Rutter (Rutter et al, 1971; Abbott et al., 1986; Liu, 1988; Valente et al., 1997) es decir aplicando un balance continuo; o a partir de la solución analítica planteada por Gash (Gash 1979; Gash et al. 1995; Zeng et al. 2000; Van Dijk & Bruijnzeel, 2001; Murakami, 2007) en todos los casos con el objetivo de la mejor representación de los procesos físicos y la incorporación de parámetros representativos de las características de la vegetación y sus variaciones temporales. En otra línea se encuentran los modelos planteados por Calder (1986, 1996) cuya concepción de la intercepción emplea la distribución de probabilidad de Poisson para determinar la cantidad de gotas de lluvia que son retenidas por el dosel forestal y desde allí se evaporan a la atmósfera o drenan hacia el suelo.

Los modelos reseñados profundizan en cuál es la afectación del dosel forestal en la cantidad de precipitación que finalmente alcanza el suelo. Otra característica, menos estudiada, de especial interés en la hidrología de las cuencas forestadas, es la modificación en las características de los eventos extremos. Al respecto Keim et al. (2004) investigan los efectos de la cobertura forestal en la relación intensidad-duración-frecuencia en eventos extremos utilizando un modelo estocástico acoplado de precipitación, evaporación y transferencia de precipitación a través del dosel

En este trabajo de tesis se implementarán los modelos de Rutter y Gash modificados para dosel ralo, en el caso del modelo de Rutter se implementará la modificación de que incorpora el índice de área foliar como parámetro del modelo (Abbott et al. 1986b) y que se encuentra implementado como un módulo del modelo hidrológico SHETRAN (Ewen et al, 2000). La modificación del modelo de Gash que se implementará es una adaptación de Gash et al. (1995), sus aplicaciones se presentan en detalle en el Capítulo 5 de esta Tesis.

2.2.1 Modelo de Rutter

Este modelo fue originalmente desarrollado por Rutter et al. (1971) para calcular la intercepción en un bosque de pinos en Gran Bretaña a partir de la evaporación desde el dosel. Más tarde fue reformulado y generalizado por Rutter et al. (1975, 1977) incorporando entre otras modificaciones el escurrimiento fustal.

El modelo generalizado por Rutter et al. (1975) requiere como datos de entrada la precipitación en períodos cortos (p.e. horaria) e información meteorológica con lo cual estima la precipitación directa, el escurrimiento fustal y la intercepción. El marco conceptual del modelo fue esquematizado por Gash y Morton (1978) y se presenta adaptado en la Figura 2.3. Considera al dosel y los fustes como reservorios que son llenados por la precipitación y vaciados por la evaporación y el drenaje y estima las tasas de entrada y salida de esos compartimientos. La estructura del dosel se describe mediante el coeficiente de atravesamiento libre (p_d) y la capacidad máxima de almacenamiento (S) mientras que para los fustes se considera el coeficiente de redistribución fustal (p_f) y la capacidad máxima de almacenamiento de los fustes (S_f).

El modelo se basa en el cálculo dinámico del balance hídrico para el dosel y los troncos mediante las ecuaciones:

$$(1 - p_d - p_f) \int P dt = \int D dt + \int E dt + \Delta C \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$p_f \int P dt = P_f + \int E dt + \Delta C_f \quad \text{Ecuación 2.12}$$

que describen como la precipitación total incidente (P , mm/h) se distribuye en la precipitación directa correspondiente al atravesamiento libre ($p_d \cdot P$), el almacenamiento de troncos o fustes ($p_f \cdot P$) y el almacenamiento del dosel ($P - p_d \cdot P - p_f \cdot P$). Las salidas del compartimiento de almacenamiento del dosel son debidas a la evaporación desde el dosel (con tasa E) y al drenaje del dosel (tasa D); por tanto la precipitación directa está dada por $p_d \cdot P + D$. Las salidas del compartimiento de almacenamiento de fustes son debidas a la evaporación desde éstos (E_f) y al escurrimiento fustal (P_f). Los balances se completan considerando las variaciones en ambos reservorios (ΔC y ΔC_f)

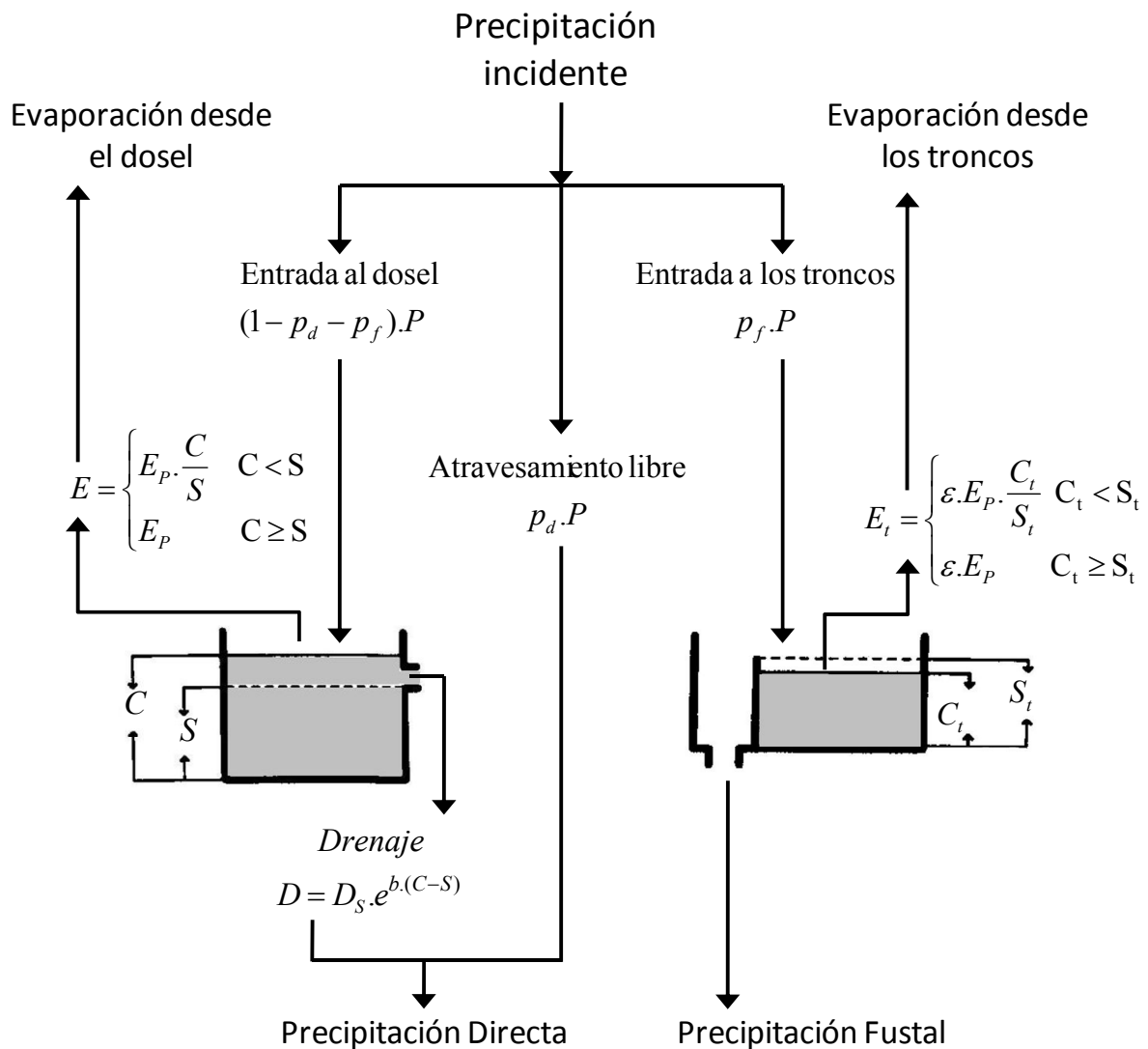


Figura 2.3 Esquema conceptual del modelo de Rutter [adaptado de Gash y Morton, 1978]

La evaporación desde el dosel saturado se obtiene a partir de la potencial (E_p) mediante la ecuación de Penman-Monteith, considerando nula la resistencia del dosel (r_s). Cuando el almacenamiento real del dosel (C) es menor a su capacidad máxima de almacenamiento (S), la evaporación se reduce en proporción a la relación entre estos.

La tasa de drenaje desde el dosel se calcula cuando el contenido de agua del dosel excede su capacidad de almacenamiento, siendo D_s la tasa de drenaje para $C=S$ y b un coeficiente empírico.

Basado en las diferencias en el espesor del almacenamiento y a la ventilación de las áreas expuestas Rutter et al (1975) considera que la evaporación desde los troncos es una fracción ε de la que se da desde el dosel, siendo en general menor al 10%.

La tasa de intercepción para el período de estudio se calcula entonces como la evaporación desde el dosel más la evaporación desde los troncos.

2.2.1 Modificación del modelo de Rutter

Abbott et al. (1986) realizaron una modificación del modelo de Rutter et al. (1971), que es esencialmente un balance del agua almacenada en el dosel. Al igual que el modelo original, esta simplificación considera que la cantidad de precipitación que es interceptada depende de la proporción del suelo cubierto, en proyección plana, por vegetación (hojas y ramas). Esa proporción varía estacionalmente pero se puede considerar que tiene un máximo c , y por tanto $(1 - c)$ es la proporción de suelo que nunca queda cubierta por vegetación. Por otro lado la evaporación del agua interceptada ocurre desde toda la superficie del dosel (incluyendo aquellas hojas que están bajo otras hojas) y depende entonces de la relación entre el área total de hojas y el área de suelo cubierta por vegetación, parámetro que se conoce como índice de área foliar (IAF).

Dichos autores consideran además que dado que el máximo volumen factible de evaporación desde el dosel es igual a la tasa de evaporación potencial multiplicada por el área de suelo cubierta por vegetación (c), la dependencia del parámetro IAF solo es válida cuando este parámetro es menor a 1. La variación del almacenamiento del dosel se calcula según Abbott et al. (1986) como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q - D_s e^{b(C-S)} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Siendo:

$$Q = \begin{cases} c.IAF(P - E_p \frac{C}{S}) & \text{si } C < S \\ c.IAF(P - E_p) & \text{si } C \geq S \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Siendo:

$$c.IAF = \begin{cases} c.IAF & \text{si } IAF < 1 \\ IAF & \text{si } IAF \geq 1 \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

P es la precipitación total incidente (mm); C es el almacenamiento real del dosel; D_s la tasa de drenaje del dosel (mm/s); b el coeficiente empírico del modelo de Rutter (mm^{-1}); S la capacidad máxima de almacenamiento del dosel (mm) y E_p la evaporación potencial calculada por Penman-Monteith. La componente de precipitación fustal no es tenida en cuenta por Abbott ya que se basa en la primer versión del modelo de Rutter y no en su generalización (Rutter, 1975). Por la tanto la intercepción calculada por Abbott tconsidera el almacenamiento real del dosel y su cobertura, siendo:

$$I = E = c.IAF.E_p \frac{C}{S} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

2.2.2 Modelo de Gash

Con base en el modelo de Rutter, Gash (1979) construye un modelo analítico que combina el fundamento físico del primero con la simplicidad de las ecuaciones de regresión. En él se considera la precipitación como una serie de eventos en cada uno de los cuales se cumplen las siguientes tres etapas: la primera es la etapa de mojado y se da entre el comienzo del evento y la saturación del dosel; la segunda es la de saturación ocurre luego que la precipitación excede la necesaria para la saturación del dosel cuya superficie permanece mojada durante toda la etapa; finalmente se da el secado que ocurre entre el final de la lluvia y hasta el secado completo del dosel y los troncos.

Al igual que el modelo de Rutter, el modelo analítico de Gash requiere de la estimación previa de los parámetros estructurales del bosque: p , p_f , S , S_f . De esa forma y partiendo de la ecuación planteada por Horton (1919) que expresa la intercepción como:

$$I = \int_0^t E dt + S \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde: E es la tasa de evaporación durante la lluvia; S la capacidad de almacenamiento del dosel y t es la duración de la lluvia

Separando la evaporación antes y después de la saturación del dosel:

$$I = \int_0^{t'} E dt + \int_{t'}^t E dt + S \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Siendo t' el tiempo necesario para la saturación del dosel y definiendo además las tasas medias de evaporación (\bar{E}) y precipitación (\bar{P}) durante el tiempo que el dosel está saturado, como:

$$\bar{E} = \frac{1}{t-t'} \int_{t'}^t E dt \quad \bar{P} = \frac{1}{t-t'} \int_{t'}^t P dt \quad \text{Ecuación 2.19 y Ecuación 2.20}$$

Se tiene:

$$P - P' = \bar{P}(t - t') \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Donde P' es la precipitación necesaria para saturar el dosel, asumiendo que no hay goteo desde el dosel antes de la saturación, P' también está dado por:

$$(1 - p - p_f)P' = \int_0^{t'} E dt + S \quad \text{Ecuación 2.22}$$

siendo al igual que para el modelo de Rutter: p el coeficiente de atravesamiento del dosel y p_f la tasa de P que se deriva al escurrimiento fustal.

Se puede expresar la intercepción del dosel, en forma de ecuación de regresión a partir de la precipitación, de la siguiente forma:

$$I = \frac{\bar{E}}{\bar{P}}P + \left(S + \int_0^{t'} Edt \right) \left(1 - \frac{\bar{E}}{\bar{P}} \frac{1}{(1-p-p_f)} \right) \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Con el objetivo de simplificar el modelo y trabajar en un paso de tiempo mayor al de Rutter, Gash asume que es posible representar el patrón real de precipitación mediante una serie de tormentas discretas, separadas por intervalos de tiempo que permitan el secado del dosel y los troncos. Para realizar este supuesto es necesario introducir las siguientes simplificaciones:

- Las condiciones meteorológicas prevalecientes durante la saturación del dosel son las mismas que para el resto de la tormenta.
- No existe goteo desde el dosel mientras este se satura y la cantidad de agua del mismo se reduce a S rápidamente al finalizar la tormenta independientemente del valor inicial.

Con este supuesto es posible reemplazar los valores de \bar{E} y \bar{P} de cada tormenta por tasas promedio calculadas para todos los eventos. Estos promedios se calculan para un período de tiempo relativamente corto, en el caso de las aplicaciones originales se ha hecho para cuatro semanas (Gash, 1979; Gash et al, 1995).

Considerando una serie de n lluvias suficientes para saturar el dosel, que estén separadas por un intervalo que permita el secado del mismo, se definen las tasas medias de evaporación y precipitación, como:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t'_j}^{t_j} Edt}{\sum_{j=1}^n (t_j - t'_j)} \quad \bar{P} = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{t'_j}^{t_j} Pdt}{\sum_{j=1}^n (t_j - t'_j)} \quad \text{Ecuación 2.24 y Ecuación 2.25}$$

Asumiendo que las tasas medias \bar{E} y \bar{P} también son validas en la etapa de mojado, la evaporación durante esa etapa es:

$$E = \bar{E} \frac{C}{S} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Y dado que no se produce goteo desde el dosel en esa etapa, el cambio del almacenamiento esta dado por la diferencia entre la tasa de entrada por precipitación y la de salida por evaporación:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\bar{P}}{(1 - p_d - p_f)} - E \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Sustituyendo 2.26 en 2.27 y resolviendo la ecuación se halla el tiempo en que se da la saturación:

$$t' = -\frac{S}{E} \ln \left(1 - \frac{\bar{E}}{\bar{P}} \cdot \frac{1}{(1 - p_d - p_f)} \right) \quad \text{Ecuación 2.28}$$

Y cumpliéndose que la tasa media de precipitación también es válida durante esa etapa se tiene:

$$P' = \bar{P} \cdot t' = -\frac{\bar{P} \cdot S}{E} \ln \left(1 - \frac{\bar{E}}{\bar{P}} \cdot \frac{1}{(1 - p_d - p_f)} \right) \quad \text{Ecuación 2.29}$$

El modelo es aplicado en base diaria, asumiendo la ocurrencia de un solo evento de precipitación por día y el secado completo del dosel entre eventos. Las distintas componentes de la interceptación durante las tres etapas se calculan según Gash (1979) como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Cálculo de las componentes de la intercepción [tomado de Gash, 1979]

Componente	Formulación
Evaporación desde el dosel para los m eventos con $P < P'$, insuficientes para saturar el dosel	$(1 - p_d - p_f) \sum_{j=1}^m P_j$
Evaporación desde el dosel, para los n eventos con $P \geq P'$, que lo saturan. El primer término corresponde a la etapa de mojado y el segundo al secado luego de que finaliza el evento.	$n \cdot (1 - p_d - p_f) P' + \frac{\bar{E}}{P} \sum_{j=1}^n (P_j - P')$
Evaporación desde los troncos, para los q eventos con $P \geq P'' = S_f / p_f$ que saturan los troncos	$q \cdot S_f$
Evaporación desde los troncos, para los m+n-q eventos con $P < P'' = S_f / p_f$ que no saturan los troncos	$p_f \sum_{j=1}^{m+n-q} P_j$

Si bien el cálculo de las tasas promedio de precipitación y evaporación suele hacerse para períodos relativamente cortos, por ejemplo mensuales o de cuatro semanas, Gash (1979) indica que esto es únicamente para una mejor apreciación de la performance del modelo y de la variabilidad de sus estimaciones no existiendo inconveniente con efectuar el cálculo de las tasas medias para todo el período de la simulación. Incluso una vez hallados estos promedios pueden ser usados en otros sitios donde se disponga únicamente de la información pluviométrica diaria y no de la información meteorológica, con lo cual se daría el paso final para hacer de la precipitación diaria la única variable de entrada a este modelo. Pearce y Rowe (1981) encontraron que esta aproximación era inadecuada para ser aplicada en climas donde los eventos de precipitación frecuentemente exceden las 24 horas, sin embargo ha sido testeada con buenos resultados en climas donde la precipitación fustal es baja y las tormentas son generalmente cortas (Lloyd et al., 1988; Gash et al., 1995). En el sitio de estudio de esta Tesis se ha encontrado que la duración media de los eventos es de 4,5 h, siendo el máximo de 19 h mientras que la precipitación fustal raramente excede el 5% de la precipitación total incidente, ambas características harían viable la utilización de tasas medias de precipitación y evaporación para todo el período, alternativa que será implementada más adelante en el Capítulo 5.

2.2.3 Modificación del modelo de Gash para bosque ralo

En la formulación original de Gash la precipitación entrante al modelo es derivada en primer término hacia la precipitación directa (a través del coeficiente p_d) y hacia el escurrimiento fustal (a través del coeficiente p_f), lo cual genera una reducción en la intensidad de la precipitación que alcanza el dosel, siendo esta igual a $(1 - p_d - p_f)P$. De esta forma cuando los valores de p_d y p_f son significativos, en especial el primero en situaciones de bosques de dosel ralo, puede darse que $(1 - p_d - p_f)\bar{P} < \bar{E}$ el dosel no alcanza la condición de saturación y la Ecuación 2.29 para el cálculo de P' resulta en un logaritmo negativo. Por otro lado y considerando que el cálculo de la evaporación con Penman Monteith es por unidad de área, al aumentar el valor de p_d aumenta proporcionalmente la evaporación por unidad de área de dosel, lo cual en el límite de $p_d \rightarrow 1$ llevaría al absurdo de evaporación infinita para un dosel de cobertura nula. Tomando en cuenta estas consideraciones Gash et al. (1995) reformulan el modelo para hacer viable su aplicación a bosques de dosel ralo considerando las siguientes modificaciones:

- $E_c = E/c$ es la tasa de evaporación desde el dosel, calculada por Penman Monteith, se considera nula la evaporación del área sin cobertura de dosel
- $S_c = S/c$ es la capacidad de almacenamiento del dosel por unidad de área cubierta, siendo c la cobertura del dosel
- El exceso de precipitación se deriva a los troncos recién después de haber saturado al dosel

Las distintas componentes de la intercepción se calculan según se muestra en la Tabla 2.4 y al igual que la versión original la intercepción se calcula a partir de la precipitación diaria asumiendo un único evento por día.

Tabla 2.4 Parámetros y formulación del modelo de Gash para dosel ralo [adaptado de Gash et al., 1995]

Parámetros	Formulación
Cobertura del dosel	$c = 1 - p_d$
Tasa media de evaporación del dosel	$\overline{E}_c = \overline{E} / c$
Capacidad máxima de almacenamiento del dosel	$S_c = S / c$
Precipitación necesaria para saturar el dosel	$P' = -\frac{\overline{P}}{\overline{E}_c} S_c \cdot \text{Ln} \left(1 - \frac{\overline{E}_c}{\overline{P}} \right)$
Componente de la intercepción	Formulación
Evaporación desde el dosel para los m eventos con $P \leq P'$, insuficientes para saturar el dosel.	$c \cdot \sum_{j=1}^m P_j$
Evaporación desde el dosel, para los n eventos con $P > P'$, que lo saturan. El primer término corresponde a la etapa de mojado y el segundo al secado luego de que finaliza el evento.	$n \cdot c \cdot P' + \frac{c \cdot \overline{E}_c}{\overline{P}} \sum_{j=1}^n (P_j - P')$
Evaporación desde los troncos, para los q eventos con $P > P'' = S_f / p_f$ que los saturan.	$q \cdot S_f$
Evaporación desde los troncos, para los n-q eventos con $P \leq P'' = S_f / p_f$ que no los saturan.	$p_f \sum_{j=1}^{n-q} P_j$

Finalmente se marca un error conceptual reportado por Valente et al. (1997), quienes refieren al hecho de que los modelos de Rutter y Gash originales consideran E (la evaporación calculada según Penman Monteith) como la evaporación desde el dosel saturado y $\varepsilon \cdot E$ la evaporación desde los troncos saturados, con lo cual la evaporación total del área sería $(1 + \varepsilon) \cdot E$, valor que excedería al potencial en contradicción con las hipótesis del balance de energía. Dado que según los mismos autores este error tiene poca importancia en términos prácticos por el bajo valor que adopta el parámetro ε , la corrección propuesta no será incorporada en este trabajo bajo la premisa de mantener la simplicidad del modelo, disminuyendo la cantidad de parámetros involucrados.

CAPÍTULO 3 - ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DE BASE

3 ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DE BASE

La información de base utilizada para este trabajo de Tesis comprende el período 14/06/2006 al 31/12/2009 y surge del banco de datos elaborado en los proyectos: PDT 32/03 “Indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable de las plantaciones de Eucaliptos en el Uruguay” e INIA FPTA 210 “Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo”. Ambos proyectos fueron desarrollados en dos microcuencas experimentales situadas en la región noroeste del Uruguay.

3.1 Características del Área de Estudio

3.1.1 Clima y características hidrológicas

La zona de estudio está ubicada en la región noroeste de Uruguay, en el departamento de Paysandú comprendida dentro de la macrocuenca del Río Queguay. En la zona se estudiaron dos microcuencas de 1 a 2 km² de superficie, que presentan cobertura vegetal diferente: *Don Tomas* y *La Cantera*, distantes entre sí unos 4 km. Los cauces de ambas microcuencas pertenecen a la vertiente sur del arroyo *Capilla Vieja*, el cual a su vez es tributario del Río Queguay.

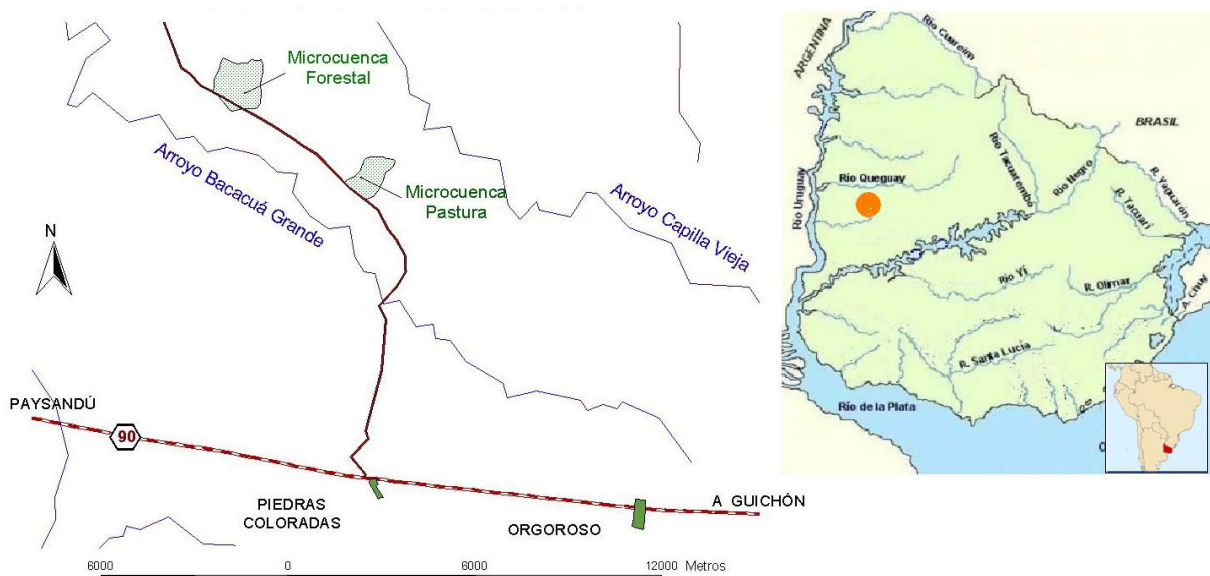


Figura 3.1 Ubicación del área de estudio

El criterio utilizado en el proyecto PDT32/03 para la selección de las microcuencas fue el de similitud hidrológica (ver Tabla 3.1), fundamentalmente en lo que refiere a tipos de suelo, dirección del flujo y tiempos de concentración, siendo la característica contrastante la cobertura vegetal de modo de analizar los efectos del cambio de uso del suelo (forestación), minimizando los posibles efectos de otras causas.

Tabla 3.1 Características hidrológicas de las microcuencas

	Don Tomas	La Cantera
Coord cierre. (lat, long)	32º 14' 55.5" S 57º 38' 48.7" W	32º 16' 37.8" S 57º 36' 14.3" W
Cobertura Vegetal	56% <i>Eucalyptus</i> / 44% Pastura	Pastura
Suelos	Areno-Arcilloso	Areno-Limoso
Geología	Arenisca fina a media y arenisca conglomerádica	
Área (km ²)	2.12	1.20
Índice de Gravelius	1.12	1.17
Long cauce(m)	1783	2168
Pendiente de cauce (%)	0.90	1.58
Pendiente de Cuenca (%)	4.68	5.92
Tiempo de Concentración (min)	39.0	36.5

La precipitación media anual en la Cuenca del Río Queguay en el período 1970-1999 fue de 1250 mm (Genta et al, 2001). La distribución anual de la precipitación se muestra en la Figura 3.2. Debido a los altos valores de la desviación estándar mensual (segunda columna de cada mes), la incertidumbre para el valor real de cada mes es muy alta; por el contrario la desviación estándar del año (línea continua oscura) es baja lo cual implica una mayor certidumbre acerca del valor medio anual para la precipitación.

Respecto a la distribución anual de los escurrimientos, a pesar de que las medias mensuales muestran una tendencia a valores mayores en el periodo de invierno, como consecuencia de la alta incertidumbre vista en las precipitaciones se observa una incertidumbre aún mayor en los escurrimientos mensuales.

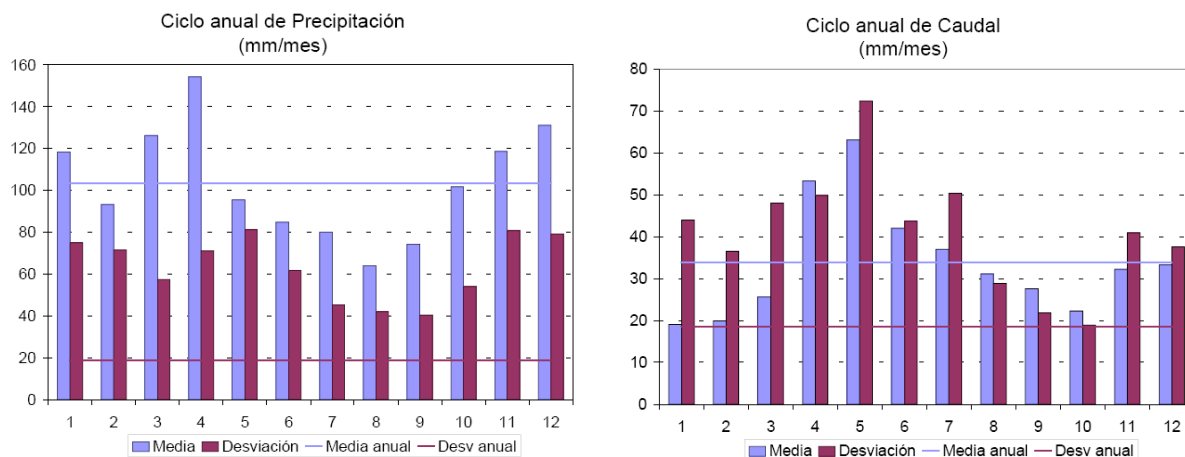


Figura 3.2 Distribución anual de la precipitación y escurrimiento (1970 – 1999), medias anuales y desviaciones estándar (columnas); media anual y desviación estándar (líneas), [adaptado de Genta et al., 2001]

Es debido a esta distribución incierta de la precipitación y por ello de la escurrimiento que se dificulta la visualización de los cambios en la relación precipitación escurrimiento a nivel anual debida a la forestación, hasta que una superficie importante se vea afectada con el cambio de uso del suelo (Silveira et al., 2006).

3.1.1 Vegetación y uso del suelo

Al igual que en el resto del país, en el litoral oeste uruguayo se ha dado un importante desarrollo de la forestación comercial durante las últimas dos décadas, en particular plantaciones de *Eucalyptus* con destino de pulpa. La cobertura vegetal en Don Tomás consiste en un 54% de la superficie con cobertura forestal principalmente *Eucalyptus globulus ssp. Maidennii* en coexistencia con malezas de porte arbustivo, *Bacharis trímera*, *Eupatorium bunifolium* y juncáceas en zonas bajas, mientras que el 46% restante lo conforman pasturas naturales. En la microcuenca de La Cantera predominan las pasturas naturales con vegetación de parque de algarrobos: *Prosopis sp* y gramíneas de ciclo invernal. Ambas microcuencas son utilizadas esporádicamente para la cría de ganado, pero no existen registros que indiquen el manejo o las cargas de ganado aplicadas.

La información disponible sobre la plantación forestal en Don Tomás pertenece al inventario forestal realizado en agosto del 2005 que se presenta en la Tabla 3.2, mientras que la distribución espacial se aprecia en la Figura 3.3.

Tabla 3.2 Caracterización de la plantación

Especie	<i>Eucalyptus globulus ssp. maidennii</i>
Fecha de plantación	Otoño - Primavera 1998
Diámetro medio de tronco (DAP)	14 cm
Altura media	14.9 m
Densidad	895 árboles/ha

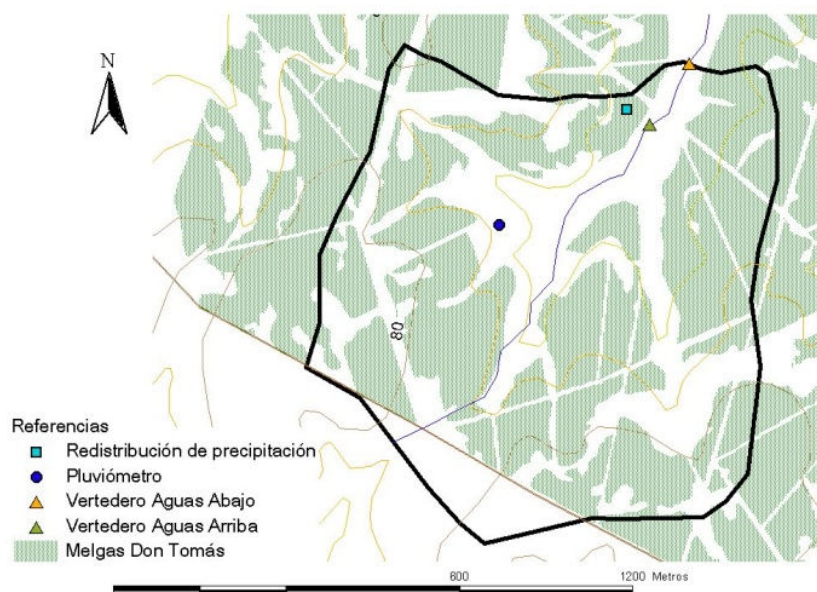


Figura 3.3 Distribución espacial de la plantación en la microcuenca Don Tomás

3.1.2 Topografía

El rango de elevación se ubica entre 49 y 82 m.s.n.m. en la microcuenca de Don Tomas, y entre 55 y 91 m.s.n.m. en la microcuenca de La Cantera. A partir de las curvas de nivel de las cartas escala 1:50.000 del Servicio Geográfico Militar y de relevamientos de campo de mayor detalle se obtuvieron los modelos digitales de terreno de ambas microcuencas representados en grillas de 50X50 m.

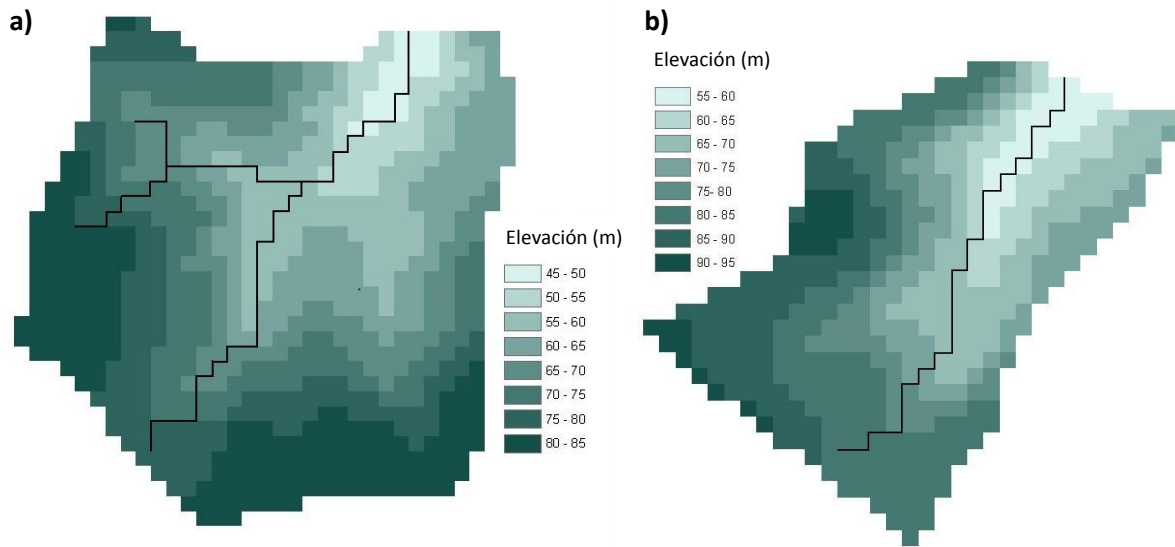


Figura 3.4 Grilla de distribución de elevación a) Don Tomás; b) La Cantera

3.1.3 Características de los suelos

Las características geomorfológicas y de distribución de los suelos en ambas microcuencas son muy semejantes, lo cual aporta validez a la metodología empleada que considera como única variable explicativa de las modificaciones en los procesos hidrológicos el uso del suelo. Los materiales generadores de los suelos son sedimentos cretácicos con relieve escarpado y valles disectados, formando lomadas fuertes y suaves. Los suelos son principalmente arenosos y areno-arcillosos de origen Cretácico, mientras que en las cabeceras de las microcuencas se encuentran suelos arcillosos y limo-arcillosos de origen Cuaternario. La descripción espacial de los tipos de suelo se obtuvo a partir de la interpretación de fotos aéreas de escala 1:20.000 y el levantamiento de información en campo, identificándose tres unidades principales presentes en ambas microcuencas:

- En las cabeceras de ambas microcuencas los interfluvios aplanados se encuentran asociaciones de suelos que clasifican como Brunosoles Subéutricos Típicos/Lúvicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos como suelos accesorios, siendo los primeros la asociación dominante.

Por debajo del interfluvio aplanado, en ambas microcuencas se encuentran sucesivos niveles de escarpas formadas por materiales cretácicos consolidados con afloramientos rocosos que a su vez presentan variaciones importantes del punto de vista litológico.

- El nivel superior de escarpas por debajo del interfluvio está constituido por materiales con alto contenido de calizas, en cuyas áreas de retroceso se desarrollan suelos francos a arenoso francos profundos, negros asociados a suelos más superficiales, Brunosoles Subéutricos Típicos.

- Por debajo otro nivel de escarpas formado por areniscas silicificadas de la Formación Guichón (Bossi et al., 1998) en cuyas áreas de retroceso se encuentran suelos pardos muy diferenciados texturalmente y bajo contenido de materia orgánica (Argisoles Dístricos Melánicos Abrúpticos) a ellos se encuentran asociados suelos superficiales o muy superficiales (Litosoles Subéutricos Ocrícos).

Las características texturales de cada unidad y su clasificación según el sistema USDA (USDA, 1993) se presentan en la Tabla 3.3 y

Tabla 3.4, mientras que la distribución espacial de las unidades en ambas microcuencas se muestra en la Figura 3.5.

Tabla 3.3 Descripción textural de los suelos de Don Tomás

	Prof. (m)	Ar(%)	L(%)	Ac(%)	Clasificación
Interfluvio	0.7	31.2	32.9	36.0	Franco Arcilloso
Argisoles Dístricos Melánicos	0.8	80.9	1.7	17.4	Franco Arenoso
Brunosoles subeutricos típicos.	1	46.7	17.6	35.7	Franco arcilloso

Tabla 3.4 Descripción textural de los suelos de La Cantera

	Prof. (m)	Ar(%)	L(%)	Ac(%)	Clasificación
Interfluvio	0.7	53.7	16.3	30.0	Franco Areno Arcilloso
Argisoles Dístricos Melánicos	0..8	68.7	4.8	27.4	Franco Areno Arcilloso
Brunosoles subeutricos típicos.	1	59.0	13.1	27.8	Franco Areno Arcilloso

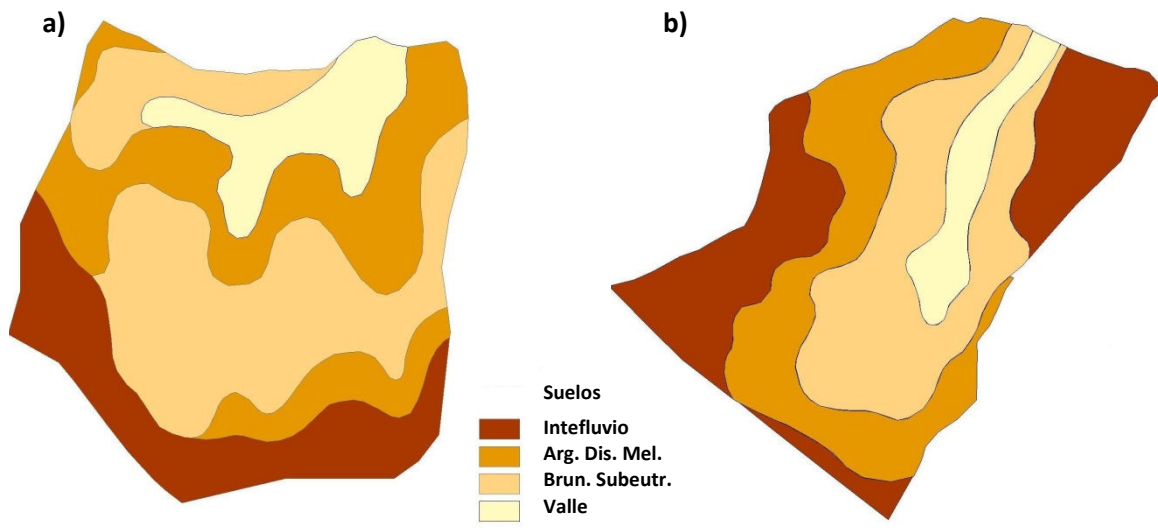


Figura 3.5 Mapa de suelos de las microcuencas: a) Don Tomás; b) La Cantera

3.1.4 Geología

La geología de la zona de estudio se describe según la Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000 de Bossi et al. (1998) por las unidades geológicas: Aluviones, Formación Mercedes y Formación Guichón. La cartografía geológica a escala 1:50.000 desarrollada para el Proyecto PDT 32/03 (Schpilov, 2008), de tipo aplicada describe las siguientes unidades litológicas homogéneas para las cuales se espera un comportamiento hidrogeológico similar: Mercedes areno-arcilloso; Mercedes conglomerádico; Mercedes calcáreo y Guichón. La secuencia sedimentaria que se esperaría en las microcuencas en estudio sería la que se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, más adelante se presentan las principales características de las unidades identificadas

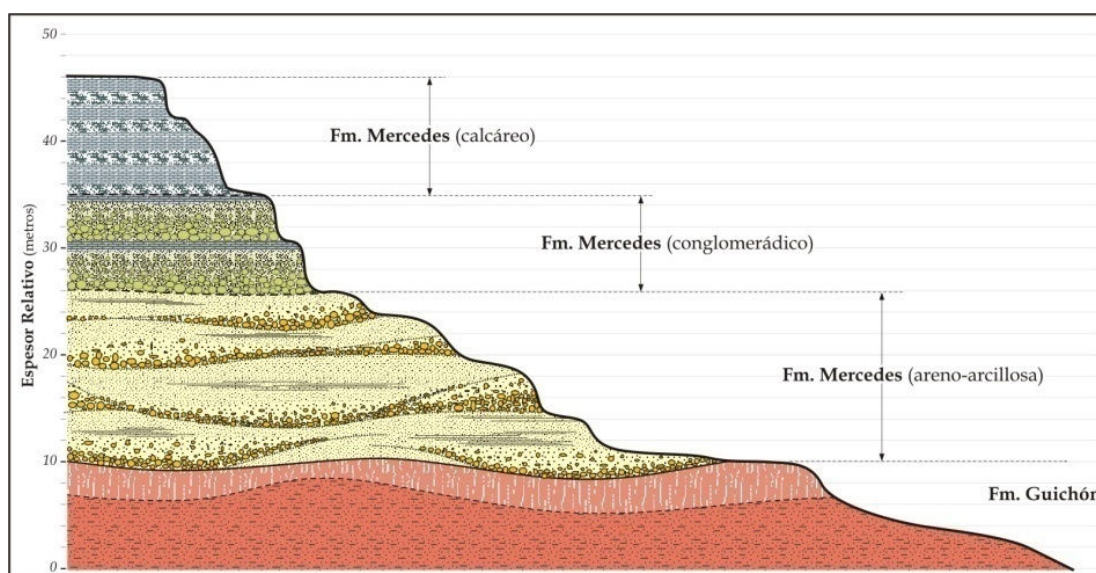


Figura 3.6 Secuencia sedimentaria

La formación Guichón está representada por una arenisca fina a media, relativamente bien seleccionada, de colores rojizos y con abundante contenido arcilloso que puede estimarse como superior al 15%.

La Formación Mercedes – areno arcillosa, incluye las areniscas finas a medias, a veces conglomerádicas, pero siempre con elevado contenido en materiales finos. Esta unidad puede presentar grados variables de cementación con sílice y en menor contenido con carbonato de calcio. Los colores dominantes son blancuzcos a grisáceos, a veces con tonalidades verdes. La estructura dominante es la estratificación plano paralela o cruzada, en sets de 1 a 2m de potencia.

La Formación Mercedes – conglomerádico se compone fundamentalmente de dos ciclos conglomerádicos granodecrecientes que pasan de conglomerados groseros a areniscas muy finas completamente cementadas con carbonato de calcio. En estos niveles la sílice es todavía un agente

secundario de cementación muy importante, sustituyendo parcialmente al carbonato de calcio y dando lugar a una textura nodular opalizada en las areniscas calcáreas. Ambos sets en conjunto tienen menos de 10 metros de potencia.

La Formación Mercedes – calcáreo se trata de areniscas calcáreas o calizas arenosas de color blanco se encuentran en la posición superior de la secuencia sedimentaria de la formación Mercedes. Se trata de areniscas finas a medias con esporádicos granos de arena gruesa bien redondeada cementadas con carbonato de calcio, en cantidades tales que permiten considerarlas calizas arenosas. Presenta un espesor máximo de 10 a 12 metros.

Considerando la circulación y almacenamiento de agua posible dada la geología que se describe en la Figura 3.6, pueden identificarse al menos cuatro pisos de permeabilidad reducida que darían lugar a igual número de acuíferos colgados como se muestra en la Figura 3.7. En la misma figura se marca la posición de las vertientes (V) o zonas húmedas identificadas, tanto en campo como en la interpretación de fotografías aéreas.

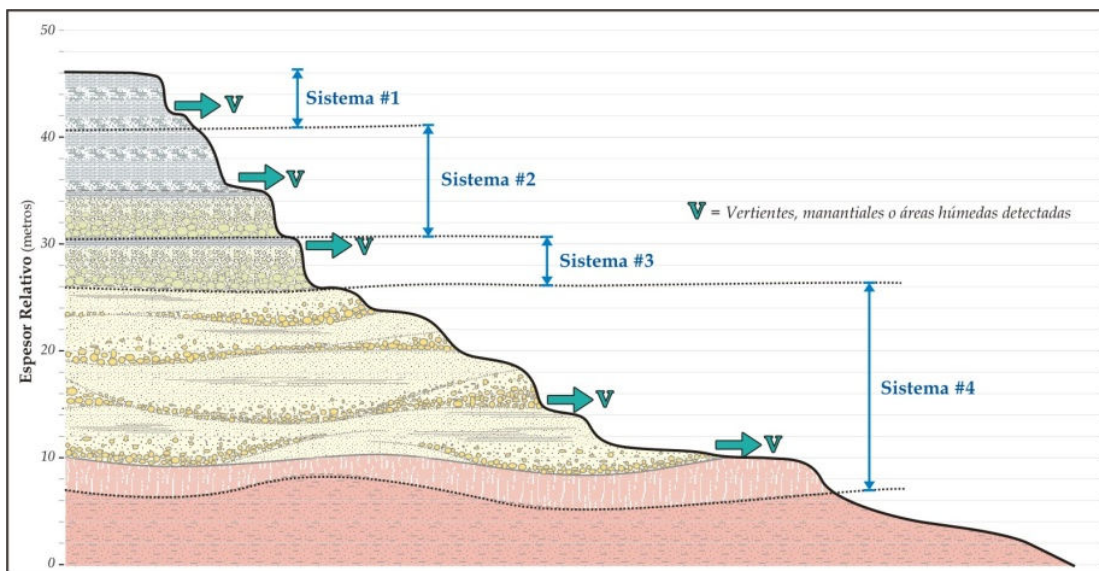


Figura 3.7 Características hidrogeológicas

3.2 Monitoreo de la información de base

El monitoreo de la precipitación total incidente en la microcuenca forestada se hace con un pluviógrafo (RAINEW 111 Tipping Bucket, Rainwise) ubicado en un claro cercano al baricentro de la microcuenca, registrando en intervalos de 5 minutos. Próximo a éste se encuentra la estación meteorológica (MK-III-LR, Rainwise) que registra con intervalos de 10 minutos: temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad de viento y precipitación. Esta información sirve de base para el cálculo de la evaporación potencial y permite además realizar la corrección de la información de precipitación de acuerdo a la velocidad del viento.

Debido a que la distancia entre ambas microcuencas es de unos 5 km, existe instalado en la microcuenca de pastura otro pluviógrafo (TS1221, Tecmes), registrando también cada 5 minutos.

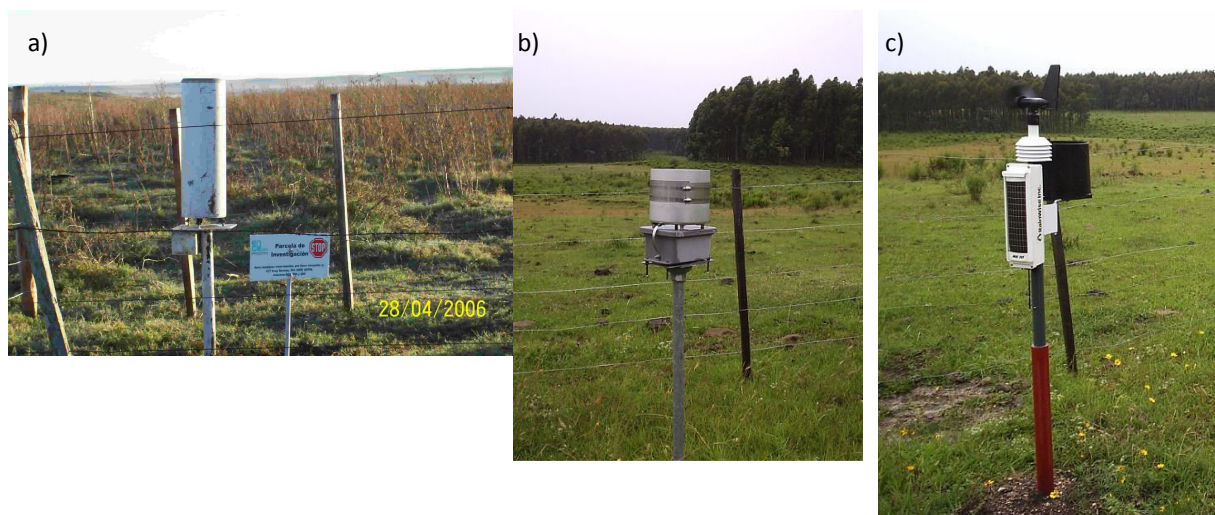


Figura 3.8 a) Pluviógrafo en La Cantera; b) pluviógrafo en Don Tomás; c) estación meteorológica

La precipitación directa es recogida en una canaleta de acero galvanizado, de sección parabólica, de 15 cm de ancho y 35 m de longitud (Huber, A com. pers.; Iroumé y Huber, 2000) colocada en el sentido de la pendiente natural del terreno y dispuesta en diagonal entre dos filas de árboles, de forma que en su recorrido cubra tanto las zonas de entrefila como las cercanas a los troncos, asegurando así la representatividad de los registros para un ecosistema o estructura del dosel heterogénea. Dicha canaleta drena hacia un tanque de 600 l de capacidad donde las variaciones de nivel son registradas utilizando un sensor de boya (Thalimedes, OTT) en el primer período del monitoreo y uno de presión durante el último año (WT-HR, Trutrack). El tanque es vaciado por una bomba que se activa mediante un sensor de nivel.

Próximos a la canaleta se seleccionaron 10 árboles para la medición del escurrimiento fustal el cual se recoge mediante collarines de goma adheridos al tronco en forma de espiral ascendente (Likens & Eaton, 1970; Ford & Deans, 1978, Huber & Iroumé, 2001). Los collarines están contruidos con un

perfil de goma de 50x4 mm que oficia de pared exterior unido a otro perfil de goma espuma de 20x30 mm los cuales luego de unidos entre sí con pegamento, se fijan al tronco mediante un clavo colocado en cada extremo, sellando las uniones con silicona para evitar pérdidas entre el tronco y la goma. Dicho escurrimiento es conducido mediante caños de PVC de 50mm de diámetro hacia otro tanque equipado con limnógrafo y bomba al igual que el anterior.



Figura 3.9 Instalaciones para el monitoreo de la precipitación directa y fustal

En el punto de cierre de cada microcuenca se instalaron vertederos triangulares para la medición de escurrimientos bajos y medios ($<1\text{m}^3/\text{s}$), la altura de agua sobre el vértice de los vertederos se registra mediante limnógrafos con sensor de boya (Thalimedes, OTT), ubicados a una distancia adecuada aguas arriba del vertedero, que registran variaciones del nivel mayores a 5 mm.



Figura 3.10 Vertederos y obras de cierre a la salida de las microcuencas

Para la estimación de los escurrimientos se utiliza una relación H-Q conformada en un primer tramo por la ecuación de descarga del vertedero triangular y en el segundo tramo, cuando éste se ve desbordado de la modelación hidrodinámica implementada en el marco del proyecto PDT.

CAPÍTULO 4 - PARÁMETROS ESTRUCTURALES DEL DOSEL FORESTAL

4 PARÁMETROS ESTRUCTURALES DEL DOSEL FORESTAL

4.1 *Parámetros generales de la modelación de redistribución*

4.1.1 Escurrimiento fustal (p_f y S_f)

Los coeficientes del escurrimiento fustal p_f y S_f , fueron determinados por Rutter et al. (1975) respectivamente como la pendiente y la constante de la línea de regresión entre el escurrimiento fustal y la precipitación total incidente para eventos aislados. El mismo autor asume que la evaporación potencial de los troncos se relaciona con la evaporación potencial mediante un coeficiente ε , que estima en cada simulación para obtener el mejor ajuste entre los valores observados y calculados de escurrimiento fustal.

4.1.2 Almacenamiento del dosel, coeficiente de atravesamiento libre y cobertura del dosel

La mayoría de los estudios de redistribución utilizan la técnica de Leyton et al. (1967) para determinar los parámetros de almacenamiento del dosel (S) y coeficiente de atravesamiento libre (p_d). Esta metodología propone la representación gráfica de la precipitación total incidente vs precipitación directa para eventos aislados. En primer lugar se estima visualmente la cantidad de precipitación necesaria para exceder la capacidad de almacenamiento del dosel, identificando el punto de inflexión de la gráfica. En segundo lugar una línea recta con pendiente ya establecida en $(1-p_d)$, como en Gash y Morton (1978) y Lloyd et al. (1988) se traza como la envolvente de todos los puntos a la derecha del punto de inflexión pasando por los puntos que representan eventos ocurridos bajo condiciones de evaporación mínima (al menos por uno). El parámetro S se obtiene como la intersección de esta línea con el eje vertical, mientras que p_d se estima como la pendiente de la regresión considerando únicamente aquellos eventos que no superan el umbral de precipitación del punto de inflexión mencionado (Aboal et al., 1999).

Una variación del método de Leyton, fue propuesta por Link et al. (2004) y consiste en aplicar dicho método para el cálculo de S y p_d , a un único evento aislado mediante la utilización de información de alta resolución (paso de 5 minutos). Este método ajusta regresiones para los períodos pre y post saturación del evento, la pendiente de la línea de regresión del período pre saturación da una estimación de p_d , mientras que S está dado por la diferencia entre la precipitación incidente y la directa para el punto de inflexión.

Por otro lado el parámetro c , o cobertura del dosel utilizado para la modificación de los modelos para bosque ralo se determina como el complemento del coeficiente de atravesamiento libre, es decir $(1-p_d)$.

4.1.3 Tasa de drenaje del dosel (D_s)

De acuerdo a Rutter et al. (1971) la tasa de drenaje del dosel en condiciones de saturación (D_s) es directamente proporcional al IAF . Sin embargo en su estudio no menciona el valor de IAF por tanto la recomendación (Rutter et al., 1975; Jetten, 1996; Aboal et al., 1999) es estimarlo asumiendo que el IAF es directamente proporcional al coeficiente de almacenamiento, S . De esta forma y dados los valores del estudio de Rutter et al. (1971), ($D_s=0,002$ mm/min y $S=1,05$ mm), puede calcularse como:

$$D_s = \frac{0.002 \cdot S}{1.05} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

4.1.4 Análisis de la información monitoreada

Entre el 13 de julio de 2006 y el 31 de diciembre de 2009 se registraron 4264 mm de precipitación total incidente en la microcuenca forestal.

Para el estudio y modelación de la interceptación la información fue analizada en base diaria asumiendo la ocurrencia de un único evento de precipitación al día, esto debido a que el presente estudio pretende generar un modelo de redistribución de la precipitación que sirva como una herramienta de uso simple en el manejo forestal. Dado que la información disponible con mayor cobertura espacial en Uruguay es la precipitación diaria, se optó por esa base temporal para el análisis. Debe considerarse además que tanto la metodología de medición de la precipitación directa y fustal como las características propias de cada evento, generan un retraso en el registro temporal de ambas que varía entre unos pocos minutos y varias horas, esto dificulta un análisis con base temporal horaria por ejemplo. Existieron casos en los que debido a la no simultaneidad mencionada la fecha del evento no coincide entre los registros originales de las distintas componentes de la redistribución, dichos casos fueron analizados en forma cuidadosa asignando al evento completo la fecha original de la precipitación total incidente. En el tratamiento de los datos se procedió a eliminar para el análisis los eventos sin registro o con incoherencias en el registro de precipitación directa, en algunos casos ésta excedía a la precipitación incidente (10 eventos) y en otros la bomba de vaciado del tanque de almacenamiento de precipitación directa falló y el registro resulta incoherente (5 eventos). Los casos en que se obtuvo interceptación negativa (precipitación directa mayor a la incidente) demuestran la existencia de errores en el monitoreo (sobrestimación de la precipitación directa o subestimación en la medida de precipitación incidente).

Los eventos no fueron eliminados por presentar incoherencias o datos faltantes en la precipitación fustal, ya que esta componente de la redistribución representa en general menos del 5% del total incidente.

En ese período pudieron registrarse en forma completa, 217 eventos que totalizan 2776 mm de precipitación total incidente. Los eventos fueron considerados independientes si el intervalo de tiempo sin lluvia que los separa es de al menos 8 horas, período considerado adecuado para el secado completo del dosel (de acuerdo a las tasas medias de evaporación). La intensidad media de los eventos fue de 2,6 mm/h, con una duración promedio de 4 h 29 min y una cantidad media de precipitación por evento de 12,8 mm. La distribución de frecuencia de los eventos muestra una marcada asimetría (Figura 4.1 y Figura 4.2) que explica la diferencia hacia valores menores entre las medianas y las medias tanto en duración como en cantidad de la precipitación (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Parámetros estadísticos para la serie de eventos identificados

	Precipitación (mm)	Duración (hh:mm)	Intensidad media (mm/h)	Intensidad máxima (mm/h)
Media	12,8	4:29	2,6	6,1
Rango	0,3 – 89.8	1:00 – 19:00	0,2 – 28,5	0,2 – 44,7
Mediana	7,1	4:00	1,5	3,1

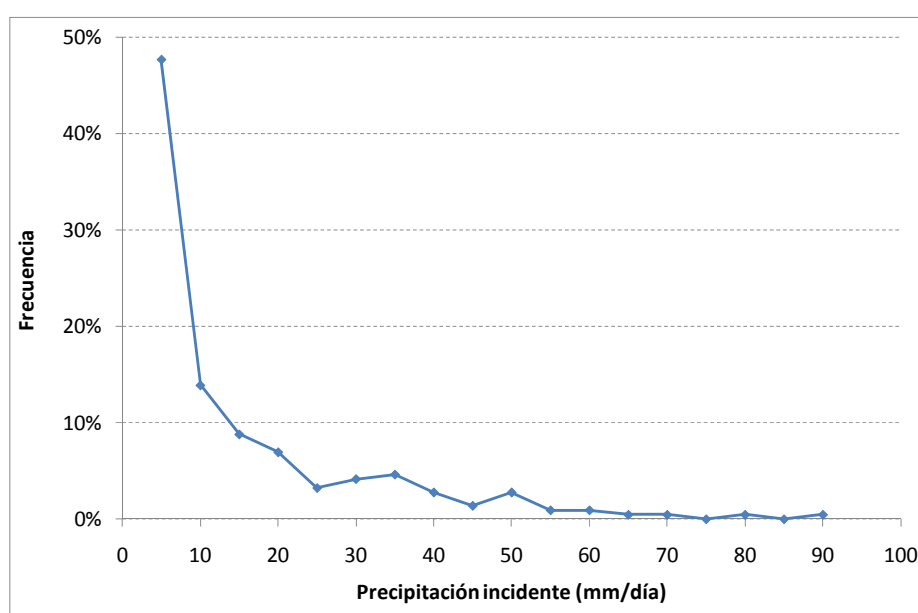


Figura 4.1 Distribución de frecuencia de la cantidad de precipitación

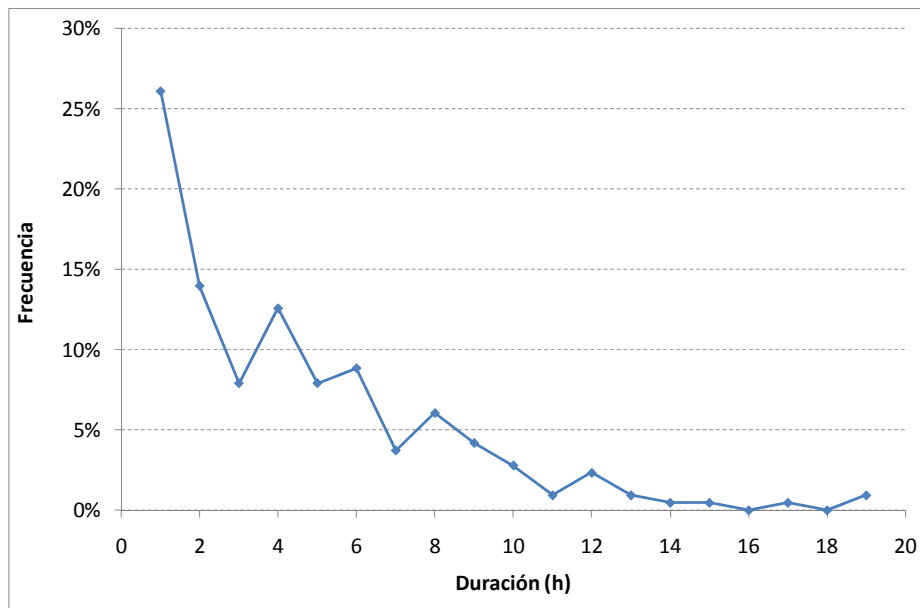


Figura 4.2 Distribución de frecuencia de la duración de la precipitación

A nivel de eventos diarios, la precipitación directa registrada representa un 79% de la precipitación total incidente, mientras que la precipitación fustal representa solo un 4%. Respecto a la interceptación, a pesar de la alta dispersión de los datos, se observa una relación de tipo logarítmica (Figura 4.3) que indica la tendencia decreciente a una asíntota en la interceptación al aumentar la precipitación incidente. Para valores medios de precipitación diaria (20-40 mm) se tiene que la interceptación representa entre 20 y 30% de la precipitación total incidente, mientras que para valores extremos (60-90 mm) ésta disminuye entre un 18-10%, en la parcela experimental objeto de estudio.

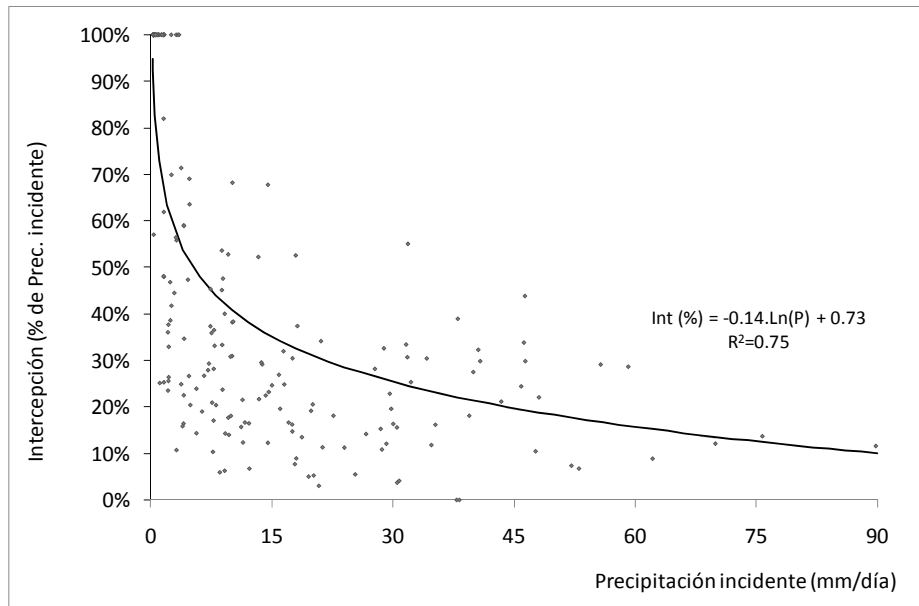


Figura 4.3 Variación de la intercepción con la precipitación incidente a nivel diario, datos observados del período jul/06-dic/09.

Analizando la información monitoreada en forma acumulada (Tabla 4.2), se observa que la intercepción acumulada anual representa entre un 23 y un 27% de la precipitación total incidente, con variaciones de entre 22 y 33% en los períodos más cálidos (octubre-marzo) y de 19 a 26% en los meses de otoño-invierno (abril a setiembre).

Tabla 4.2 Información observada, acumulados mensuales

Fecha	(mm/mes)				I (% P)
	P	P _D	P _F	I	
jul-06	33.2	26.3	1.0 ^(*)	5.9	18
ago-06	45.9	31.9	1.2 ^(*)	12.8	28
sep-06	30.5	22.4	0.4	7.7	25
oct-06	101.6	77.9	4.0	19.8	19
nov-06	4.6	2.4	(*)	2.2	47
dic-06	16.8	12.4	(*)	4.4	26
ene-07	0.3	0.0	0.0	0.3	100
feb-07	167.7	133.1	1.0	33.6	20
mar-07	318.4	238.2	3.8	76.5	24
abr-07	99.3	78.8	2.1	18.4	19
may-07	38.9	26.1	0.2	12.5	32
jun-07	34.9	27.5	2.9	4.5	13
jul-07	8.2	5.2	0.0	3.0	37
ago-07	47.4	33.2	1.0	13.2	28
sep-07	102.1	75.5	2.7	23.9	23
oct-07	130.3	80.1	5.4	44.8	34
nov-07	67.4	37.1	3.2	27.1	40
dic-07	57.7	36.9	2.4	18.4	32
ene-08	45.5	27.6	1.6	16.3	36
feb-08	93.2	67.9	2.4	22.9	25
mar-08	43.0	25.6	0.8	16.6	39
abr-08	46.9	31.8	1.1	14.0	30
may-08	58.3	55.6	1.7	1.4	2
jun-08	31.4	26.3	0.8	4.3	14
jul-08	55.8	37.1	1.7	17.0	31
ago-08	90.4	73.5	4.0	12.9	14
sep-08	22.7	14.0	0.2	8.5	37
oct-08	34.5	24.0	0.7	9.9	29
nov-08	18.3	10.8	0.3	7.2	39
dic-08	18.0	7.7	0.3	10.0	55
ene-09	121.7	83.6	5.3	32.8	27
feb-09	92.1	80.3	4.0	8.3	9
mar-09	103.8	80.8	4.7	18.2	18
abr-09	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
may-09	35.5	23.2	1.1	11.2	31
jun-09	4.3	1.5	0.0	2.9	66
jul-09	35.0	29.3	1.6	4.0	11
ago-09	29.1	20.1	0.7	8.2	28
sep-09	35.4	24.7	1.2	9.5	27
oct-09	8.9	6.3	0.5	2.1	24
nov-09	275.9	216.5	16.7	42.6	15
dic-09	161.3	118.7	5.1	37.5	23
Subtotales (mm)	2766	2032	88	647	23%

^(*)Información incompleta o faltante

4.1.5 Resultados

Los valores de los parámetros relacionados al escurrimiento fustal, S_f y p_f fueron estimados a partir de la regresión lineal entre precipitación fustal y precipitación incidente se muestran en la Figura 4.4.

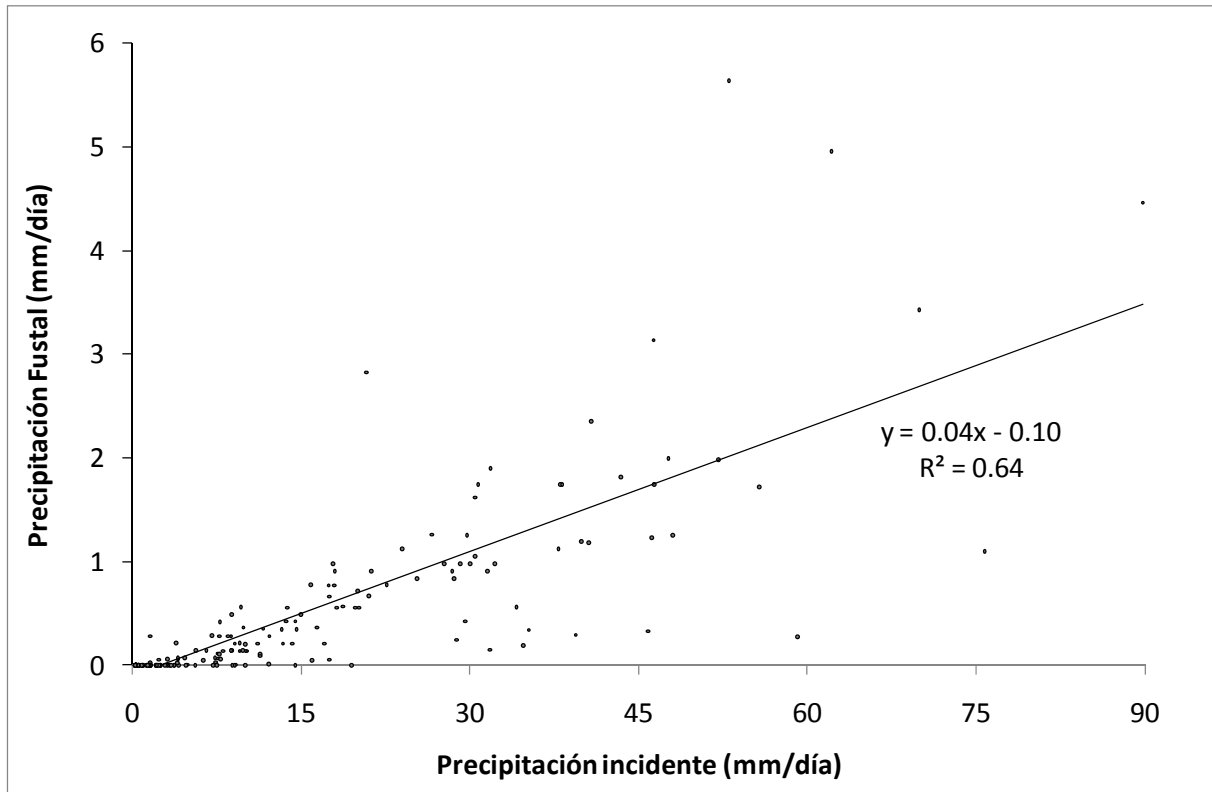


Figura 4.4 Relación Precipitación fustal – Precipitación incidente, para eventos diarios

En segundo lugar se estimó S (parámetro estructural del dosel), siguiendo la metodología descrita anteriormente. La Figura 4.5 muestra la relación entre la precipitación directa y la precipitación total incidente para los eventos diarios seleccionados, se observan en ella las características típicas de esta relación (Rutter et al., 1971). El umbral de inflexión para la determinación de la envolvente superior se estableció en 1,6 mm. Como resultado se obtiene una estimación del parámetro S de 0,70 mm y del coeficiente p_d de 0,263. El coeficiente c (cobertura del dosel) se estima como el complemento de p_d , $(1-p_d)$, siendo entonces su valor de 0,737.

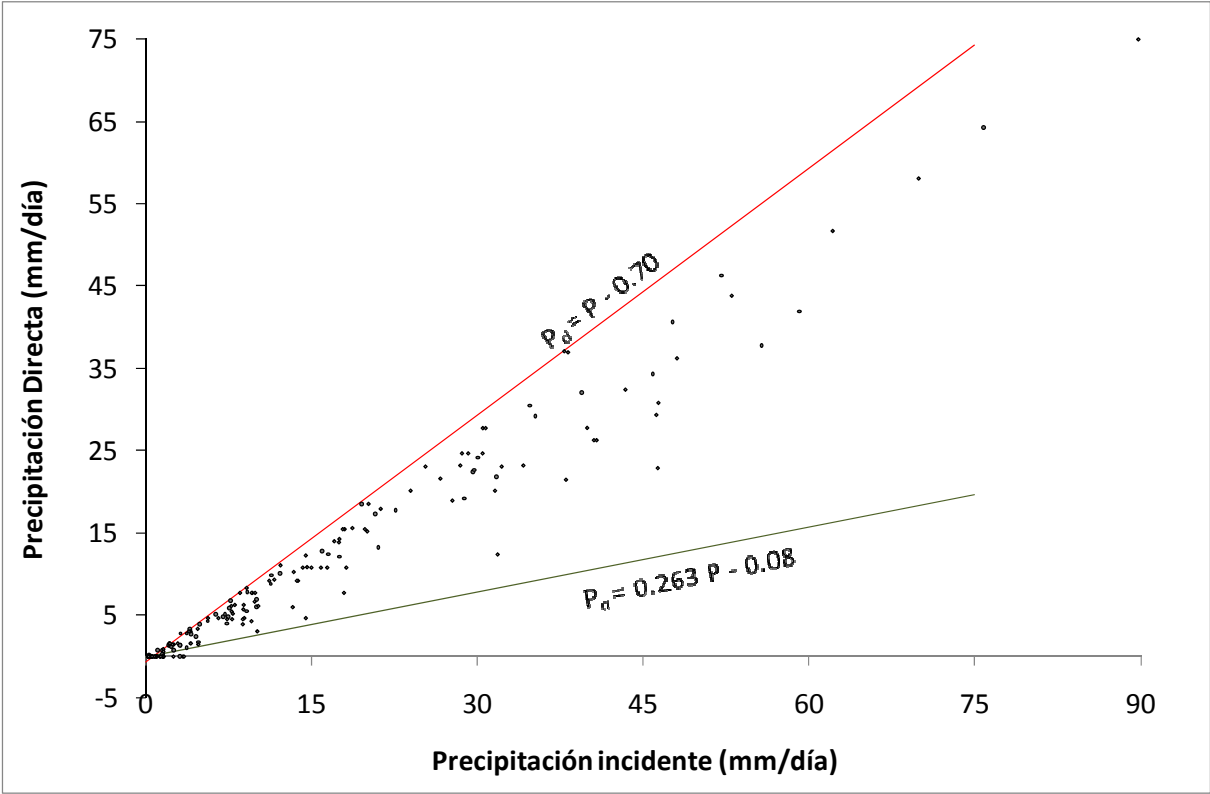


Figura 4.5 Relación Precipitación directa – Precipitación incidente, para eventos diarios

4.2 Índice de área foliar (IAF)

4.2.1 Definición y características

El índice de área foliar (IAF), es una variable adimensionada que describe la relación de área foliar por unidad de superficie de suelo. En la exhaustiva revisión de Jonckheere et al. (2004) se da cuenta de las distintas definiciones existentes, es importante notar que de acuerdo a la definición utilizada pueden encontrarse diferencias significativas en los valores de IAF reportados en la bibliografía. En general se refiere al IAF como la relación de área foliar de un lado de tejido fotosintético por unidad de área de suelo (Watson, 1947), si bien esta definición es clara para el caso de especies planifolias como el *Eucalyptus*, no lo es tanto para especies que presenten hojas enrolladas, arrugadas o arqueadas o para el caso de coníferas. La definición más tradicional y la que resulta más ajustada para su utilización en el contexto de la intercepción del dosel de *Eucalyptus*, es la que presentan Teske y Thistle (2004) cuando se refieren al área proyectada de un lado de la hoja, por unidad de superficie de suelo.

El valor de IAF depende de la especie, la etapa de desarrollo, condiciones predominantes en el sitio y prácticas de manejo. Es un parámetro dinámico que varía en forma significativa estacionalmente (primavera y otoño) y también anualmente hasta llegar a la madurez del cultivo. Debido a estas características y a las diferencias en los métodos de medición existe gran diversidad de valores de IAF en la literatura, Jonckheere et al. (2004) reportan valores entre 0,4 y 16,9 en parcelas de roble y pino respectivamente. Scurlok et al. (2001) en su recopilación de más de 1000 estimaciones de IAF realizadas para el período 1932-2000 presenta un valor de IAF medio (\pm desviación estándar) para plantaciones de bosque de $5,34 \pm 4,14$ y en particular para *Eucalyptus* de $3,51 \pm 1,08$, mientras que de la recopilación de Whitehead y Beadle (2004) el valor medio de IAF en plantaciones de *Eucalyptus* es de $3,19 \pm 1,61$ y de $2,60 \pm 1,06$ si solo se consideran las plantaciones en condiciones naturales de crecimiento, es decir sin riego ni fertilización. En estas recopilaciones bibliográficas existe una gran diversidad de metodologías aplicadas para la determinación del IAF, sin embargo en el análisis de Scurlock solo se evidencia una ligera tendencia a valores mayores cuando se utiliza la técnica de determinación directa mediante cosecha.

4.2.2 Metodología para su estimación

Existen formas directas e indirectas de medir el IAF. Las directas son las más apropiadas pero tienen la desventaja de ser costosas e insumir mucho tiempo, son por lo tanto difíciles de aplicar a gran escala y no se compatibilizan con los monitoreos a largo plazo de la dinámica del desarrollo del área foliar. Sin embargo mantienen su importancia para la validación de los métodos indirectos y la calibración de metodologías. Las distintas formas para la determinación del IAF identificadas en Jonckheere et al. (2004); Weiss et al. (2004) y Scurlock et al. (2001), incluyen:

- Cosecha destructiva y determinación directa del área foliar, ya sea utilizando papel cuadriculado, escaneado y análisis de la imagen o mediante sistemas de medición automática de base óptica (Li-3100, Licor, NE, USA).
- Recolección y pesado de la hojarasca y utilizando la relación área/peso de submuestras, para determinar el área total de hojas.
- Relaciones alométricas utilizando relaciones específicas basadas en medidas destructivas sobre submuestras (basada en alguna dimensión física característica como diámetro a altura de pecho, DAP).
- Métodos indirectos de contacto: plomadas e interceptómetros mecánicos u ópticos.
- Métodos indirectos sin contacto, basados en la transmisión de luz a través del dosel como LAI-2000 (Li-Cor Inc., USA); ceptómetro AccuPAR LP-80 (Decagon Devices Inc., USA); TRAC (3rd Wave Engineering, Canada), análisis de fotografías hemisféricas y de imágenes de sensores remotos hiperespectrales.

a) Medida directa

Los métodos directos como la cosecha destructiva, son en teoría los más adecuados ya que brindan los resultados más ajustados a la realidad. Tienen sin embargo varias desventajas: son costosos, insumen mucho tiempo y son operativamente difíciles de implementar, por lo tanto no son compatibles con el monitoreo de largo plazo de las dinámicas espaciales y temporales del desarrollo de la plantación (Jonckheere et al., 2004). La metodología descrita por esos autores menciona un mínimo de muestra de 3 a 5 árboles para representar un rodal homogéneo en edad y distribución espacial como lo es el sujeto de este estudio.



Figura 4.6 Dos de las imágenes escaneadas para medida directa del IAF.

Ante la falta de recursos para implementar dicha metodología y aprovechando la caída de un árbol cercano a la parcela experimental sucedida durante una tormenta, se realizó a modo de ensayo la determinación del área foliar mediante la colecta de toda la hojarasca del ejemplar. Las hojas fueron recogidas y colocadas en 6 bolsas de arpillera. Debido al volumen de la muestra no se realizó el secado de las hojas previo a la pesada, la cual fue realizada inmediatamente al regreso del campo. Se contabilizó en forma manual la cantidad de hojas en 4 de las 6 bolsas y se estimó el número de hojas total mediante la relación [peso de bolsa]-[número de hojas de la bolsa] obtenida para las 4 bolsas contabilizadas. De las hojas contabilizadas se extrajo una submuestra de 200 hojas que una vez pegadas en hojas de papel tamaño A4 fueron escaneadas (Figura 4.6), luego se les digitalizó el contorno para posteriormente realizar la medida de área. La submuestra fue obtenida separando aproximadamente una de cada 300 hojas contabilizadas.

b) Fotografía hemisférica del dosel

La fotografía hemisférica, también conocidas como imagen de “ojo de pez” debido al lente utilizado, es una técnica efectiva y de bajo costo para describir cuantitativamente la arquitectura y el régimen de radiación del dosel de un bosque (Cescatti, 2007; Jonckheere et al., 2004; Weiss et al., 2004). La fotografía es un registro permanente y por lo tanto una fuente de información de la posición,

tamaño, densidad y distribución de los huecos del dosel. Capta las diferencias de especie, sitio y edad en la arquitectura del dosel, basándose en la atenuación de la luz y el contraste dentro de la imagen (cielo vs dosel). Se trata de una foto tomada desde debajo de la cubierta vegetal con un lente hemisférico orientado hacia el zenit, dando un ángulo de visión de 180° y proyectando el hemisferio al plano.

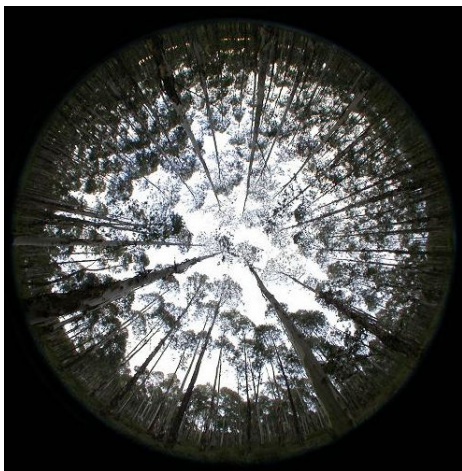


Figura 4.7 Fotografía Hemisférica de la parcela experimental de *Eucalyptus*.

El tipo de proyección varía con el lente utilizado, la más común es la proyección polar o equi-angular que asume que el ángulo al zenit de cualquier punto de la bóveda, es directamente proporcional a la distancia a lo largo de un eje radial dentro de la imagen. Resulta así una imagen circular con el zenit en el centro y el horizonte en el perímetro.

El análisis de las fotografías se basa en la estimación de la fracción gap (fracción de cielo visible a través del dosel). La fracción gap tiene una relación no lineal con el IAF, que se determina mediante modelos de inversión de transferencia radiativa, y cuantifica la apertura y arquitectura del dosel. Es equivalente a la medida de la transmitancia de radiación solar hacia el suelo asumiendo que la vegetación se comporta como un cuerpo negro (Munka, 2010). La fotografía hemisférica se procesa con programas de análisis

de imágenes especialmente diseñados; algunos de ellos son gratuitos y de acceso libre: GLA (Frazer et al., Canadá-USA, 1999); CAN-EYE (Baret, INRA, Francia, 1994); DHP-TRACWin (Leblanc, Canadá Centre for Remote Sensing, Canada, 2008). Otros forman parte de paquetes comerciales como el Hemi-View (Delta-T Devices Ltd), el WinScanopy (Regent Instruments Inc.). Según Macfarlane et al. (2007) son factores centrales para el análisis: la exposición de la foto; el método de clasificación de los píxeles (elección del umbral) y la resolución de la imagen.

El tiempo de exposición del film al tomar la fotografía influye considerablemente en la determinación del IAF, en general subestimándolo (Macfarlane et al., 2000; Zhang et al., 2005). El uso de cámaras digitales contribuye a evitar esos problemas ya que los sensores digitales tienen mejores cualidades que eliminan errores frecuentes en otras cámaras, minimizan los tiempos de trabajo y mejoran las posibilidades de tratamiento de las imágenes. Zhang et al. (2005) desarrollaron un protocolo de campo con el que demostraron que la exposición óptima para obtener valores ajustados de IAF es de 2 veces respecto a la de referencia tomada bajo cielo abierto.

El otro punto crucial del análisis de las fotografías hemisféricas es la elección del umbral de segmentación de la imagen para lograr la separación entre el primer plano (dosel) y el fondo (cielo). Generalmente dicha segmentación se efectúa de manera manual seleccionando para cada imagen un umbral de gris que indique la mejor separación entre el dosel y el cielo. Esta selección manual es un procedimiento inexacto y difícilmente reproducible ya que el resultado es altamente dependiente de la experiencia y del juicio del operador (MacFarlane et al., 2000; Inoue et al., 2004; Jonckheere et al., 2005; Zhang et al., 2005; Cescatti, 2007).

Nobis y Hunziker (2005) desarrollaron una metodología de determinación del umbral basada en un algoritmo cuyo principio es buscar el valor de umbral para el cual se da el mayor contraste en los bordes, es decir entre las zonas clasificadas como cielo y dosel.

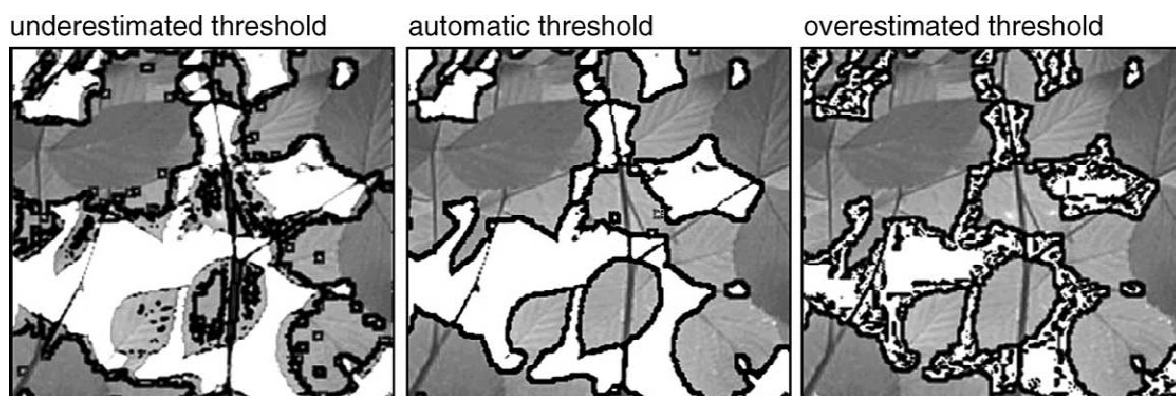


Figura 4.8 Posición de los pixel de borde para distintos umbrales [tomada de Nobis y Hunziker, 2005].

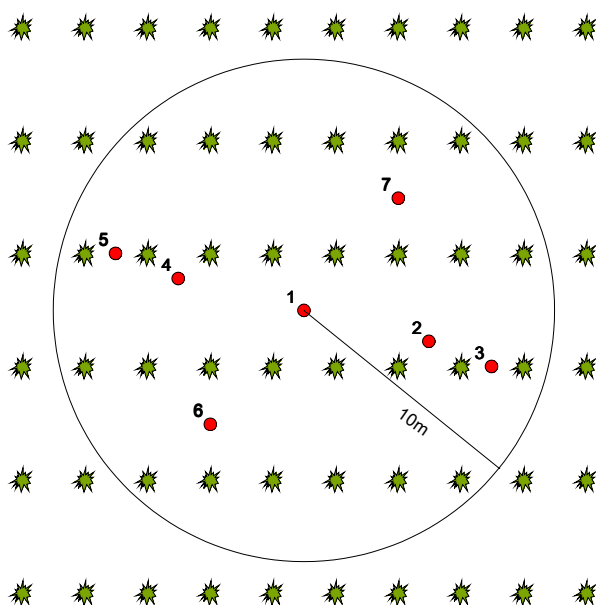
Los autores definen como t_{opt} al valor óptimo de umbral t correspondiente al máximo promedio de diferencia de luminosidad en los bordes. La imagen original es transformada en 255 imágenes individuales formadas únicamente con pixeles blancos y negros, utilizando un umbral t distinto para cada transformación (entre 0 y 254, correspondiente a una imagen RGB de 24 bit). En cada imagen transformada se utiliza una ventana móvil de 2x2 para calcular el promedio del valor absoluto de las diferencias de brillo, únicamente para los pares de pixeles que representan un borde, es decir con distinto valor. El umbral óptimo queda definido entonces como aquel para el cual la diferencia de brillo promedio en la imagen original alcanza su valor máximo. Este algoritmo se encuentra implementado en el software SideLook (Nobis, M; disponible en www.appleco.ch) y fue evaluado satisfactoriamente por sus autores, probando sus ventajas sobre el procedimiento manual ya que logra resultados similares o ligeramente mejores con la ventaja de ser un procedimiento objetivo y con tiempos de cálculo mucho menores.

4.2.3 Procedimiento para la determinación del IAF mediante fotografía hemisférica

El procedimiento de campo se tomó de la adaptación del trabajo de Zhang et al. (2005) realizado por la Universidad de Carolina del Norte para las parcelas experimentales ubicadas en el norte del país y validado en la tesis de Maestría de la Ing. Agr. Carolina Munka (Munka, 2010), quién dirigió el trabajo de registro fotográfico en las parcelas objeto del presente estudio. Se utilizó una cámara Nikon CoolPix 4500 con un lente "ojo de pez" FC-E8 adosado, para el montaje de la cámara se utilizó un trípode, una montura de rótula; mientras que un nivel colocado sobre el cubre-lente aseguraba el correcto posicionamiento de todo el conjunto. Las fotografías fueron tomadas en cinco parcelas del mismo rodal en que se encuentra la parcela experimental de monitoreo de redistribución de la

precipitación y cercanos a esta. La ubicación para la toma de la fotografía es fundamental ya que al estar los árboles plantados en cuadrículas de 4,5 x 2,5m, es esperable que las fotografías tomadas en la fila tengan mayor valor de IAF que las tomadas en la entrefila.

La metodología planteada considera la selección de parcelas de muestreo de 20m de diámetro con una superficie de 315 m², dentro de las cuales se tomaron fotografías caracterizables en tres grupos de posiciones relativas: una en la entrefila (posiciones 1, 6 y 7 en la Figura 4.9); otra entre árboles a 1 metro de la fila (posiciones 2 y 4 en la Figura 4.9) y la última en la fila (posiciones 3 y 5 en la Figura 4.9).



En cada ubicación y siguiendo la recomendación de Zhang et al. (2005) fueron tomadas fotografías con la misma apertura del lente pero distinta velocidad de disparo. En particular se tomaron 3 fotografías con 1, 2 y 3 veces más la velocidad de disparo determinada automáticamente por la cámara para cielo abierto fuera de la cobertura del bosque, lo que permite posteriormente seleccionar para el análisis la imagen que presente mayor contraste.

Figura 4.9 Posición de las fotografías dentro de cada parcela.

Las imágenes fueron analizadas en una primera instancia usando el software SideLook (Nobis, M; disponible en www.appleco.ch) que previo filtrado de la imagen en la banda azul determina automáticamente el umbral de separación entre el primer plano (dosel) y el fondo (cielo) para la obtención de la imagen binaria (Figura 4.10 b).

Posteriormente la imagen binaria fue analizada con el software GLA (Frazer et al., Canada-USA, 1999) que calcula el IAF y otro conjunto de parámetros que no son considerados en este caso. Los resultados analizados fueron los que arroja el programa como el valor en el cuarto anillo.

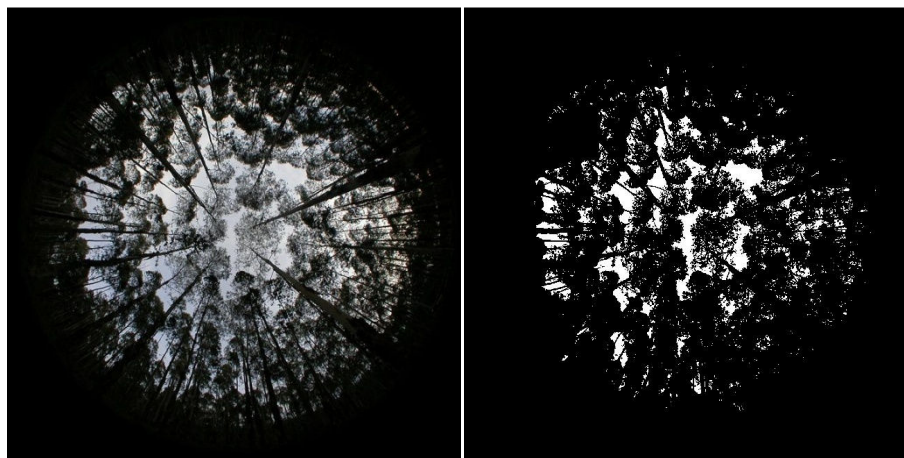


Figura 4.10 a) Imagen original; b) Imagen binaria con umbral automático.

4.2.4 Resultados

Los resultados obtenidos de índice de área foliar con la metodología de determinación por medición directa indican que la submuestra de 200 hojas presenta una superficie foliar media de $21,07 \text{ cm}^2$. Considerando que la estimación de hojas del ejemplar analizado alcanza las 28.332 hojas y que dicho ejemplar representa una superficie de suelo de $11,25 \text{ m}$ (correspondiente a la cuadrícula de plantación de $4,5\text{m} \times 2,5\text{m}$) resulta un IAF medido directamente de 2,65.

En segundo lugar se presentan los resultados obtenidos con la metodología de la fotografía hemisférica. Las fotografías de los distintos sitios muestran una distribución espacial homogénea del dosel, exceptuando los sitios ubicados cerca del límite exterior del rodal y que por tanto muestran menor homogeneidad en la distribución foliar del dosel (Figura 4.11).

Como era esperable dentro de un mismo sitio se presentaron mayores valores de IAF en las ubicaciones correspondientes a las filas y menores en las entrefilas, como se resume en la Tabla 4.3.

Sin embargo, analizadas ambas series de datos, la diferencia entre sus valores medios no resultó estadísticamente significativa (prueba t), ni se verificó la independencia entre ambas muestras ya que presentaron la misma distribución (prueba de Kolmogorov-Smirnov). Se considera por tanto válido tomar, como valor representativo del rodal muestreado, el valor medio de la serie de muestras de IAF estimadas mediante la metodología de la fotografía hemisférica, siendo éste $1,82 \pm 0,27$ (valor medio \pm desviación estándar).

La diferencia que se observa en el valor del IAF determinado mediante ambos métodos responde principalmente a que el valor obtenido mediante medición directa es una aproximación grosera ya que se utilizó un solo ejemplar, caído durante una tormenta y próximo al borde de la melga de plantación, por lo cual no puede considerarse una muestra representativa del sitio de la parcela experimental y se consideró válido únicamente con el objetivo de aplicar la metodología descrita.

Tabla 4.3 Valores de IAF para los distintos sitios y posiciones evaluados

	Posiciones en la entrefila				Posiciones en la fila				
	1	6	7	Media	2	3	4	5	Media
Sitio 1	1.94	1.67	1.81	1.81	1.84	2.04	1.76	1.76	1.85
Sitio 2	1.96	2.44	2.24	2.21	2.39	1.93	2.45	2.31	2.27
Sitio 3	1.68	2.02	1.5	1.73	1.68	1.86	1.78	1.65	1.74
Sitio 4	1.69	1.77	1.64	1.70	1.82	1.79	1.71	1.72	1.76
Sitio 5	1.62	1.35	1.56	1.51	1.68	1.62	1.58	1.59	1.62

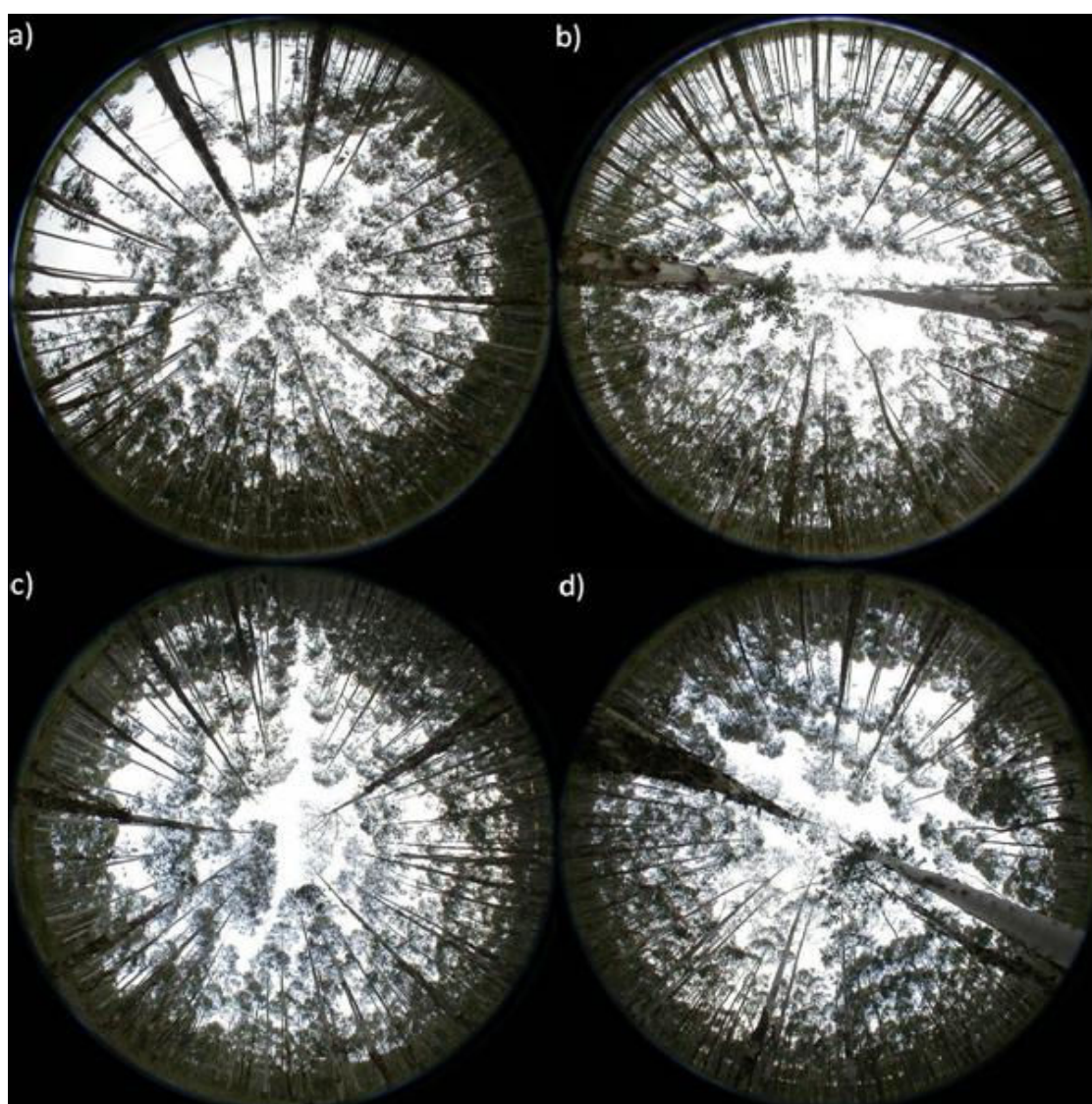


Figura 4.11 Fotografías hemisféricas: a) entrefila de parcela central del rodal; b) fila de parcela central del rodal; c) entrefila de parcela en límite exterior del rodal; d) fila de parcela en límite exterior del rodal.

CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS

5 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS

En lo que sigue se indica el proceso de implementación de los modelos bajo estudio, se definen sus variables de entrada, los parámetros, se establecen las variables y los criterios del procedimiento de calibración y se muestran y discuten los resultados obtenidos. A modo de cierre de la implementación de los modelos de redistribución, se presenta un estudio de sensibilidad para sus parámetros de mayor relevancia.

Como ejercicio de aplicación de los modelos de redistribución estudiados, se implementa el modelo de Zhang en las microcuencas experimentales modificándolo mediante la incorporación de la intercepción y obteniendo una calibración de su parámetro fundamental, para ambas coberturas.

5.1 Variables de entrada y parámetros

La principal variable de entrada en ambos modelos es la precipitación total incidente, en el modelo de Gash ésta es ingresada en forma acumulada diaria, mientras que el modelo de Rutter utiliza una discretización mayor pudiendo ser de hasta cinco minutos. En la aplicación de Rutter que se desarrolla en esta tesis se utilizó un paso horario para su ingreso, debido a que el tiempo de recorrido del agua de precipitación directa y fustal por las conducciones no permite un paso temporal menor. La evaporación potencial es la segunda variable de entrada en el modelo de Rutter siendo necesario ingresarla con el mismo paso elegido en la precipitación (horario).

Por su parte tanto el modelo de Gash original como sus modificaciones consideran a la tasa de precipitación media \bar{P} y la tasa media de evaporación \bar{E} , como parámetros del modelo que una vez estimados pueden ser aplicados a todo el intervalo de la simulación, como se comentó en el Capítulo 2. Para su determinación es necesario disponer de ambas en formato horario, lo que hace necesario considerarlas como variables de entrada en una primera implementación.

Los parámetros involucrados en ambos modelos pueden clasificarse como parámetros atmosféricos y parámetros estructurales del dosel. En el primer grupo, conformado por las tasas medias de precipitación y evaporación (\bar{P} y \bar{E}), se tiene que si bien el cálculo de la tasa media de precipitación es directo, la metodología para estimar la evaporación involucra distintas variantes para la estimación de parámetros intermedios como se reseñó en el Capítulo 2. En este sentido es que la tasa media de evaporación será considerada como parámetro de calibración en el modelo de Gash. Los del segundo grupo que ya fueron descritos en el Capítulo 4, son en su mayoría comunes a ambos modelos y fueron determinados previamente a la implementación de éstos, a menos de la tasa de drenaje del dosel (D_s) que será el parámetro de calibración del modelo de Rutter modificado.

5.2 Calibración y validación de los modelos

Las simulaciones de ambos modelos fueron realizadas durante el período julio 2006 a diciembre 2009, omitiendo aquellos períodos en que los eventos no fueron registrados en forma completa. Para la calibración se comparan los resultados calculados con los acumulados mensuales de las observaciones registradas en el período julio 2006 a diciembre 2008, mientras que el último año del período, enero a diciembre 2009, se toma como intervalo de validación de los modelos.

Se consideran dos indicadores del buen ajuste de las simulaciones: en primer lugar la función objetivo propuesta por Nash & Sutcliffe (1970) aplicada a la intercepción (I) que se expresa como:

$$Nash = \frac{F_o^2 - F^2}{F_o^2} = 1 - \frac{F^2}{F_o^2} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

$$F_o^2 = \sum [I_{obs} - \overline{I_{obs}}]^2 \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$F^2 = \sum [I_{obs} - I_{calc}]^2 \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Siendo: I_{obs} [mm] la intercepción mensual observada en la parcela experimental; $\overline{I_{obs}}$ el promedio de la intercepción mensual observada en el período de calibración y finalmente I_{calc} [mm] la intercepción mensual calculada en la simulación del modelo.

En segundo lugar se evalúa el porcentaje de error en la estimación del volumen de intercepción acumulado en el período, calculado como:

$$EV = \frac{V_{obs} - V_{calc}}{V_{obs}} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Siendo: V_{obs} [mm] el volumen de intercepción observado acumulado en todo el período de simulación y V_{calc} [mm] el volumen de intercepción simulado acumulado en el mismo período.

5.2.1 Modelo de Gash para dosel ralo

El primer punto en la implementación de este modelo es el cálculo de las tasas medias de precipitación y evaporación para lo cual y siguiendo la metodología originalmente planteada por su autor, se consideraron períodos mensuales. Sin embargo se encontró que en varios meses la relación $\bar{E}/\bar{P} > 1$, en esas condiciones el dosel no cumple la hipótesis de alcanzar la condición de saturación y, tanto la Ec. 2.29 para el cálculo de P' , como su modificación para dosel ralo resultan en un logaritmo negativo. En una primera instancia se optó por considerar períodos más largos en la determinación de las tasas medias, en particular los períodos abril-setiembre y octubre-marzo, lo cual no solucionó en todos los casos el problema del logaritmo negativo.

Se implementaron entonces combinaciones de las variantes ya reseñadas para el cálculo de la resistencia aerodinámica del dosel y la estimación de los parámetros que intervienen en su determinación. De esta forma la evaporación se calculará según diez combinaciones de parámetros aplicados a la ecuación de Penman-Monteith.

Como última variante la evaporación se calculará siguiendo lo expuesto en Lankreijer et al (1993) a partir de la regresión planteada en el modelo de Gash, entre las observaciones de intercepción y precipitación total, calculada para los eventos del período en que dicha tasa media se considera constante: $E_{\text{regr.}}$:

$$I = aP + b \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Dónde:

$$a = \bar{E}/\bar{P} \quad \text{y} \quad b = \left(S + \int E dt \right) \left\{ 1 - \left(\bar{E}/\bar{P} \right) (1 - p_d)^{-1} \right\} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Las tasas medias de precipitación (\bar{P}) para todo el período y de evaporación (\bar{E}) calculadas según las cuatro variantes seleccionadas se presentan en la Tabla 5.1 y Figura 5.1, respectivamente.

Tabla 5.1 Tasas medias de precipitación mensuales para la aplicación del modelo de Gash modificado

	$\bar{P} (mm/mes)$											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
año 2006							4.6	2.3	3.4	5.0	2.0	2.6
año 2007	--- ⁽¹⁾	5.0	5.6	2.9	3.9	1.9	0.9	1.4	2.2	3.2	5.6	3.3
año 2008	3.5	4.5	3.8	5.7	3.6	3.0	3.4	6.8	1.2	2.0	2.5	3.0
año 2009	4.0	5.3	8.2	--- ⁽¹⁾	1.7	0.9	3.6	1.9	2.3	3.0	9.1	5.3

⁽¹⁾ La precipitación en estos meses no alcanza a la de saturación del dosel

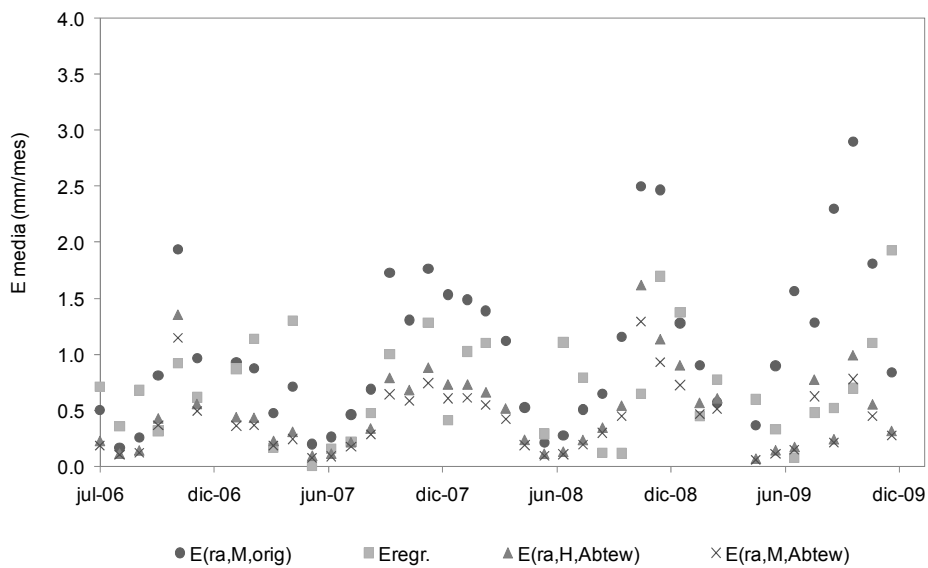


Figura 5.1 Variantes de cálculo de \bar{E} , para la aplicación del modelo de Gash modificado.

Siguiendo la formulación planteada en Gash et al. (1995) se estima la intercepción, mediante el cálculo de las distintas componentes que se describen en la Tabla 2.4.

Ya en las primeras simulaciones se observa que la precipitación directa modelada tiene un comportamiento muy similar a la observada, mientras que la precipitación fustal modelada por Gash no es representativa de las observaciones, como puede verse en la Figura 5.2 en la cual las componentes se calculan utilizando la tasa media de evaporación $E(r_{a,M}, Rutter)$.

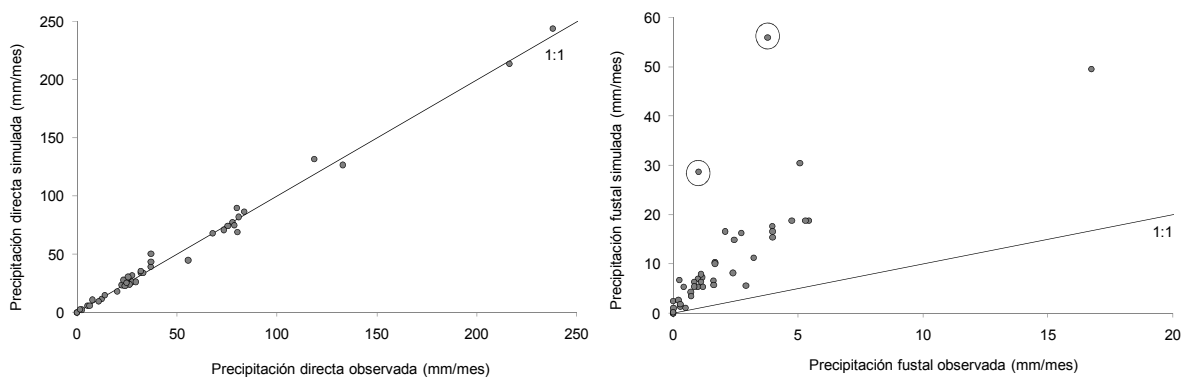


Figura 5.2 Primera estimación de las componentes de precipitación directa (izq) y fustal (der)

Claramente se observa que, aún sin considerar los eventos donde el dato medido no es confiable (marcados con círculos), la modelación de la precipitación fustal sobreestima fuertemente las observaciones, lo cual lleva a una subestimación muy importante en la intercepción modelada.

Se plantean entonces dos justificaciones posibles: la primera es que las condiciones locales tanto ambientales como de estructura del dosel no sean las adecuadas para la aplicación del módulo de precipitación fustal de la formulación propuesta por Gash y Valente; la segunda es que la metodología de medición del escurrimiento fustal no sea adecuada y se esté recolectando un volumen menor al que efectivamente alcanza el suelo escurriendo por los troncos. Se descarta este último punto ya que la metodología utilizada es la de uso más extendido en estos estudios (ver Cap. 2) y los valores de precipitación fustal así registrados son coherentes con los reseñados en la bibliografía para la especie y clima.

Una cuidadosa revisión de las aplicaciones de este modelo reseñadas en la bibliografía indica que una gran parte desprecia el término de precipitación fustal por su baja incidencia, mientras que otras lo consideran para el cálculo de la intercepción observada pero eliminan esta componente en el modelo asumiendo que los troncos son parte del dosel (van Dijk y Bruijnzeel, 2001a; Deguchi et al., 2006). Finalmente se encontró que las aplicaciones que si utilizan el modelo completo y obtienen buenas aproximaciones con el escurrimiento fustal observado presentan como característica común tasas medias de precipitación menores a 1,5 - 2mm/h en el período de simulación (Gash et al 1980 y 1995; Loustau et al, 1992; Herbst et al. 2006 y 2008). Esta situación difiere de las condiciones locales presentadas en la Tabla 5.1 ya que la tasa media de precipitación promedio en el período es de 3,6 mm/h y solamente en menos del 20% de los meses del período se verifican valores menores a 2mm/h. Claramente las condiciones de menor intensidad en la precipitación favorecen el aumento del almacenamiento, tanto en el dosel como en los troncos, siendo al parecer en este rango más sensible la segunda componente.

Otra característica, que se destaca en segundo lugar es la relación entre los parámetros del escurrimientos fustal (S_f y p_f), los cuales determinan el valor de P'' y con ello la cantidad de eventos para los cuales el modelo define la evaporación. Loustau et al. (1992) y Cuartas et al. (2007) presentan relaciones S_f/p_f de hasta un orden mayor a las locales, lo cual aumenta el valor de P'' y disminuye la cantidad de eventos para los cuales se da la evaporación desde los troncos (número q , Tabla 2.4).

Se introduce entonces una modificación en este módulo del modelo según la cual la precipitación fustal ocurrirá cuando la precipitación supere a la P'' definida por Gash et al. (1995) pero será modelada según la relación obtenida de la regresión entre las observaciones de precipitación total y precipitación fustal, es decir:

$$P_f = \begin{cases} 0 & \text{si } P \leq P'' \\ p_f P - S_f & \text{si } P > P'' \end{cases} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Con esta variación en la formulación original, se realiza entonces la simulación de la intercepción con los modelos de evaporación seleccionados. Las características de las once combinaciones junto a los indicadores del ajuste se presentan en la Tabla 5.2, y la representación gráfica puede observarse en la Figura 5.3.

Tabla 5.2 Características e indicadores de los 11 modelos de evaporación usados en la calibración del modelo de Gash ralo.

Descripción ⁽¹⁾	r_a considerando transferencia de calor	Parámetros ⁽¹⁾		Calibración	
		d	z_0	Nash	EV
$E(r_{a,M} R)$	X	0.75H	0,1H	0,84	22,4%
$E(r_{a,H} R)$	si	0.75H	0,1H	0,91	5,4%
$E(r_{a,M} S)$	X	0.75H	0,076H	0,91	8,3%
$E(r_{a,H} S)$	si	0.75H	0,076H	0,89	10,0%
$E(r_{a,M} A)$	X	0,85 0,737 H	0,13(H-d)	0,90	9,2%
$E(r_{a,H} A)$	si	0,85 0,737 H	0,13(H-d)	0,86	16,5%
$E(r_{a,M} A+R)$	X	0.85H	0,1H	0,91	4,8%
$E(r_{a,H} A+R)$	si	0.85H	0,1H	0,92	2,9%
$E(r_{a,M} A+S)$	X	0,85 0,737 H	0,076H	0,92	0,8%
$E(r_{a,H} A+S)$	si	0,85 0,737 H	0,076H	0,88	13,2%
$E_{regr.}$	----	----	----	0,87	12,6%

⁽¹⁾ la referencia para la determinación de los parámetros z_0 y d están indicadas como: (R) Rutter et al. (1971); (S) Shuttleworth (1989) y (A) Abtew et al (1989):

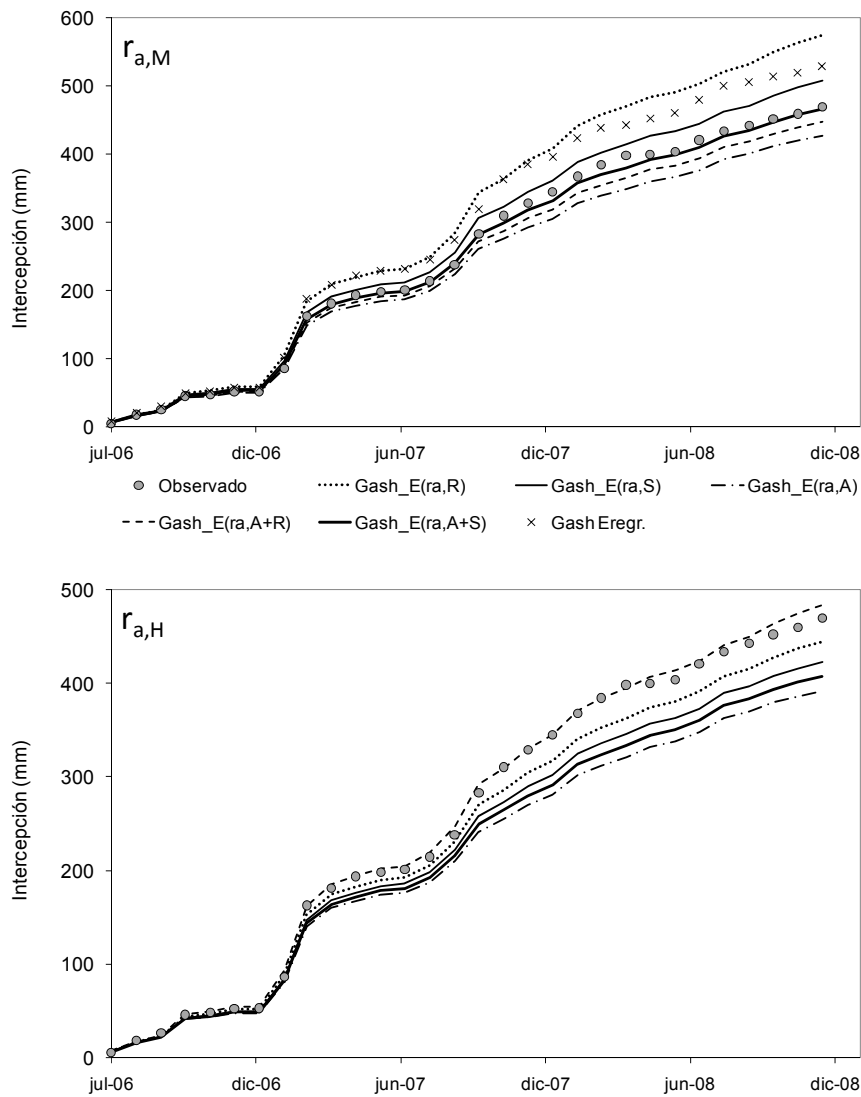


Figura 5.3 Intercepción acumulada en el período de calibración según las variantes de cálculo de \bar{E}

Se destaca como mejor ajuste el correspondiente a la variante $E(r_{a,M},A+S)$, para el cálculo de la tasa media de evaporación, con indicadores para el período de calibración Nash=0,92 y EV=0,8% y para el período de validación: Nash=0,75 y EV=13,1%.

5.2.2 Modelo de Rutter

La anterior implementación define que la segunda variable de entrada de este modelo será la evaporación potencial definida $E(r_{a,M}, A+S)$. Mientras que los parámetros de incidencia en el modelo de Rutter modificado por Abbott son: S (mm) la capacidad máxima de almacenamiento del dosel; IAF el índice de área foliar; c la cobertura máxima del dosel; D_s (mm/s) la tasa de drenaje del dosel y b (mm^{-1}) el coeficiente empírico del modelo de Rutter.

Según Rutter et al. (1975), el modelo no resulta sensible a variaciones en el parámetro b , por lo que será considerado igual al de su estudio ($3,7 \text{ mm}^{-1}$), mientras que es moderadamente sensible a las variaciones de D_s y aún más a las de S . El mismo autor plantea que tanto el parámetro D_s como el S varían proporcionalmente con el IAF, consideración por demás atendible ya que se trata de parámetros que expresan las características físicas del dosel. Por esto y una vez determinados los parámetros estructurales mediante observaciones, se considera apropiado ajustar el modelo mediante la determinación de dos coeficientes de proporcionalidad (C_s y C_D) que cumplan:

$$S = C_s \cdot IAF \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$D_s = C_D \cdot IAF \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Con los valores del parámetro S y del IAF, se obtuvo directamente el coeficiente de proporcionalidad C_s parámetro que así fue ingresado al modelo, restando para la calibración el ajuste del coeficiente de proporcionalidad C_D . La mejor simulación fue obtenida para la pareja de parámetros $C_s=0,385 \text{ mm}$ y $C_D=5,5 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$, lo que representa $D_s = 1,0 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$, obteniéndose indicadores para el período de calibración: Nash=0,80 y EV=0,5 %. Mientras que en la validación se obtuvieron valores de Nash=0,76 y EV=2,8 %. La comparación gráfica de ambos períodos se presenta en la Figura 5.4.

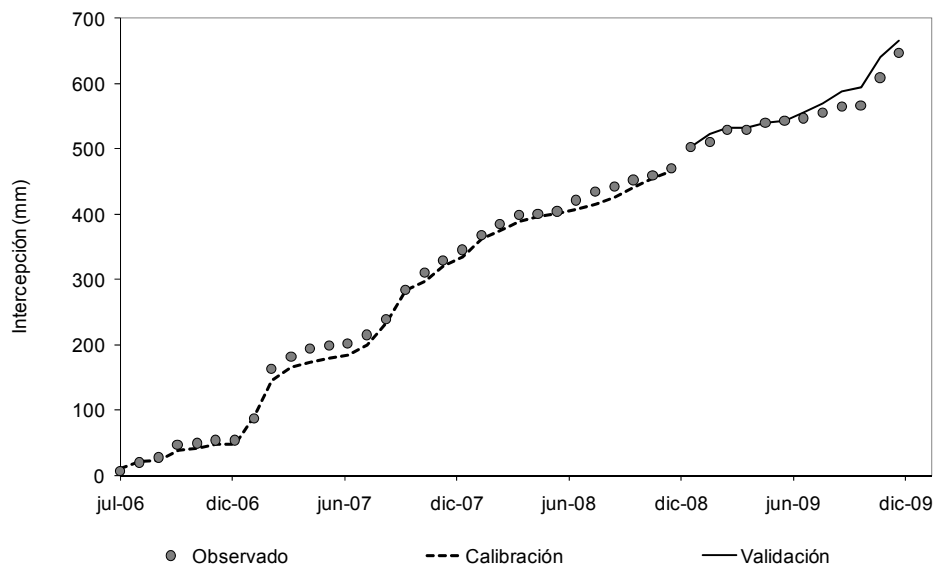


Figura 5.4 Ajuste del modelo de redistribución de Rutter modificado

Se observa que el mejor ajuste del modelo corresponde al período jul-06 a diciembre-06, coincidiendo prácticamente con el período de disponibilidad de datos en la estación meteorológica local para el cálculo de la evaporación. Esto demuestra la importancia para el modelo de contar con datos meteorológicos cercanos al sitio. Otra observación refiere al apartamiento de las series observados y calculados en el final del período de validación, en el cual se registraron los eventos con mayor intensidad de precipitación en todo el período monitoreado, superiores a 40 mm/h.

5.3 Sensibilidad de los modelos

Con el objetivo de conocer el grado de precisión necesario al definir cada parámetro, se realizó un análisis de sensibilidad para ambos modelos siguiendo un procedimiento clásico para este tipo de análisis (Bathurst, 1986) y tomando como base la simulación del período de calibración (julio 2006 – diciembre 2008) en la parcela experimental de Don Tomás.

El análisis se realizó variando un parámetro a la vez y la sensibilidad de los modelos se midió, con respecto a la mejor simulación de cada uno, en términos del cambio en el número de Nash obtenido entre las series de valores de intercepción observada y calculada y del cambio en el volumen de intercepción calculado. La cuantificación de dichos cambios se calculó según:

$$\varepsilon Nash = \frac{Nash - Nash_c}{Nash_c} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.10}$$

$$\varepsilon V = \frac{Vol - Vol_c}{Vol_c} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.11}$$

Donde el prefijo ε , indica la característica de error relativo y el subíndice c indica el valor correspondiente a la mejor simulación obtenida en la fase de la calibración del modelo.

El rango de variación de cada parámetro en el análisis se estableció en función de los límites dados por las variaciones observadas para cada uno en la bibliografía consultada, con particular referencia a *Eucalyptus*, intervalos que se resumen en la Tabla 5.3 para ambos modelos.

Tabla 5.3 Intervalos de variación de los parámetros

	min	Óptimo (calibración)	max	Gash	Rutter
S(mm)	0,1	0,7	2,5	X	X
p_d	0,08	0,263	0,45	X	X
\bar{P} (mm/h)	1,4	3,6	7,2	X	
\bar{E} (mm/h)	0,1	0,57	0,7	X	
S_f (mm)	0.005	0,1	0,17	X	
p_f	0,02	0,04	0,1	X	
D_s (mm/s)	5×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}		X
b (mm ⁻¹)	2	3.7	5.0		X

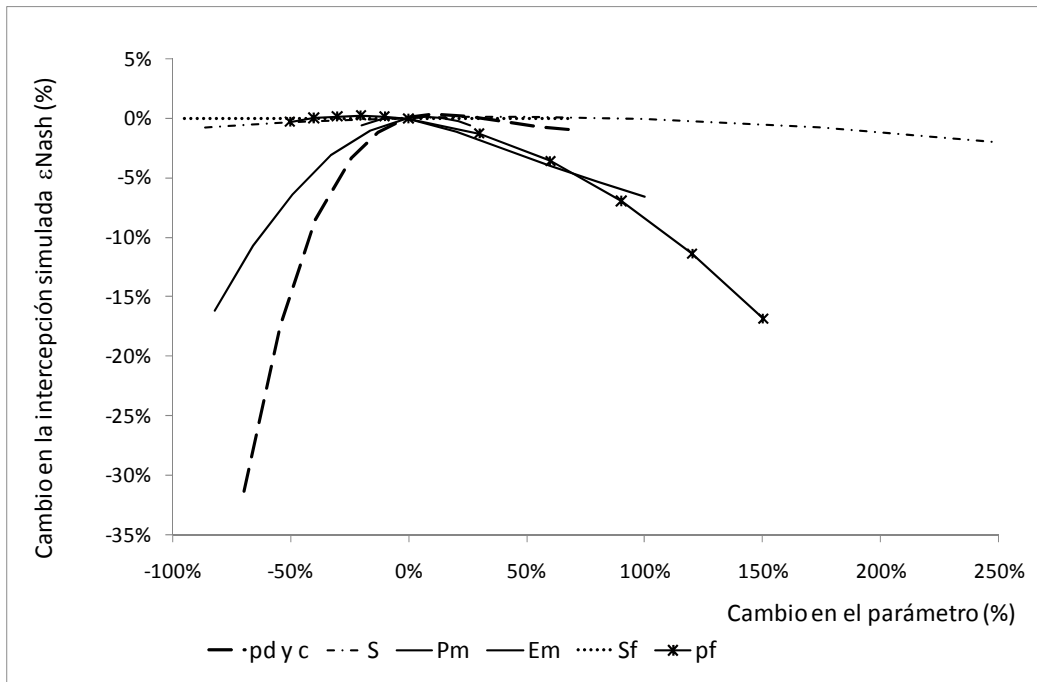


Figura 5.5 Sensibilidad del modelo de Gash expresada como ϵ_{Nash}

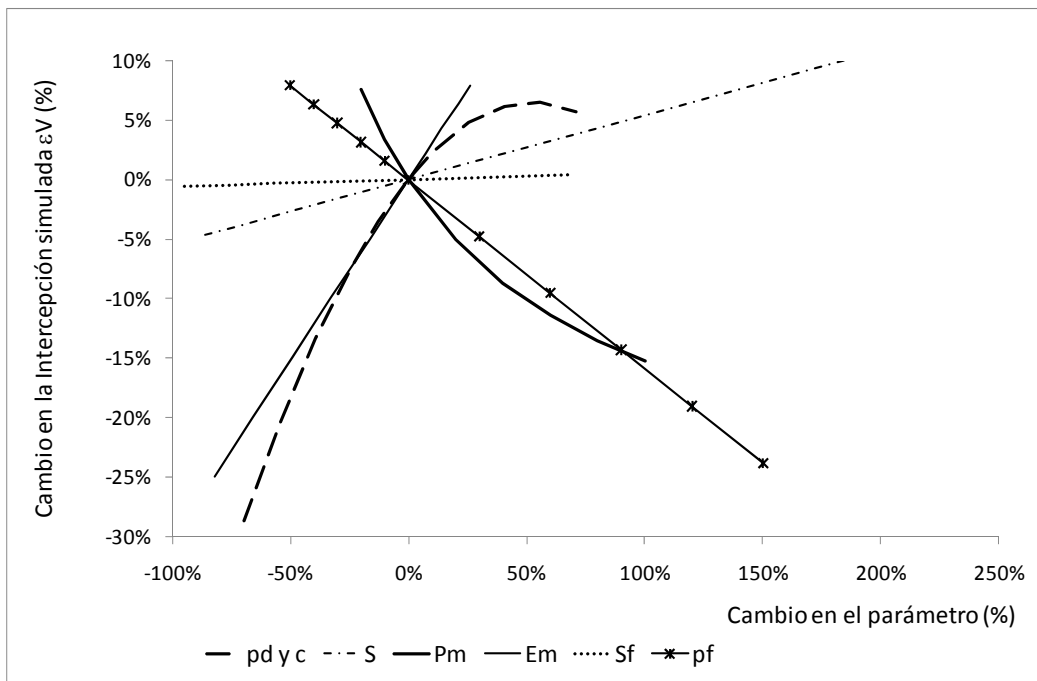


Figura 5.6 Sensibilidad del modelo de Gash expresada como ϵ_V

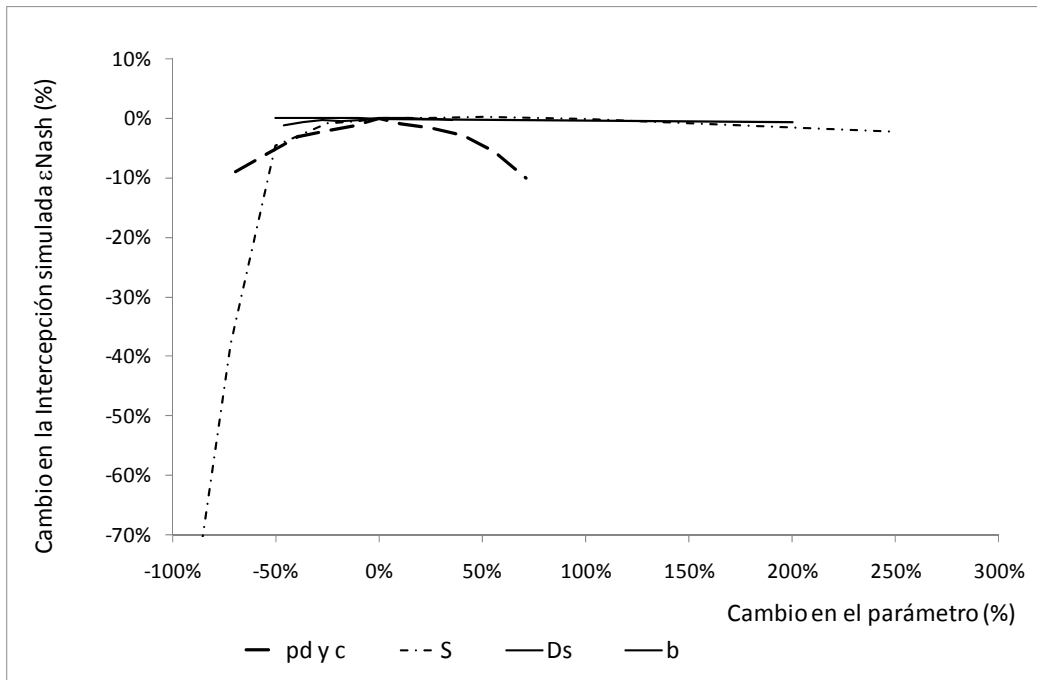


Figura 5.7 Sensibilidad del modelo de Rutter expresada como ϵ_{Nash}

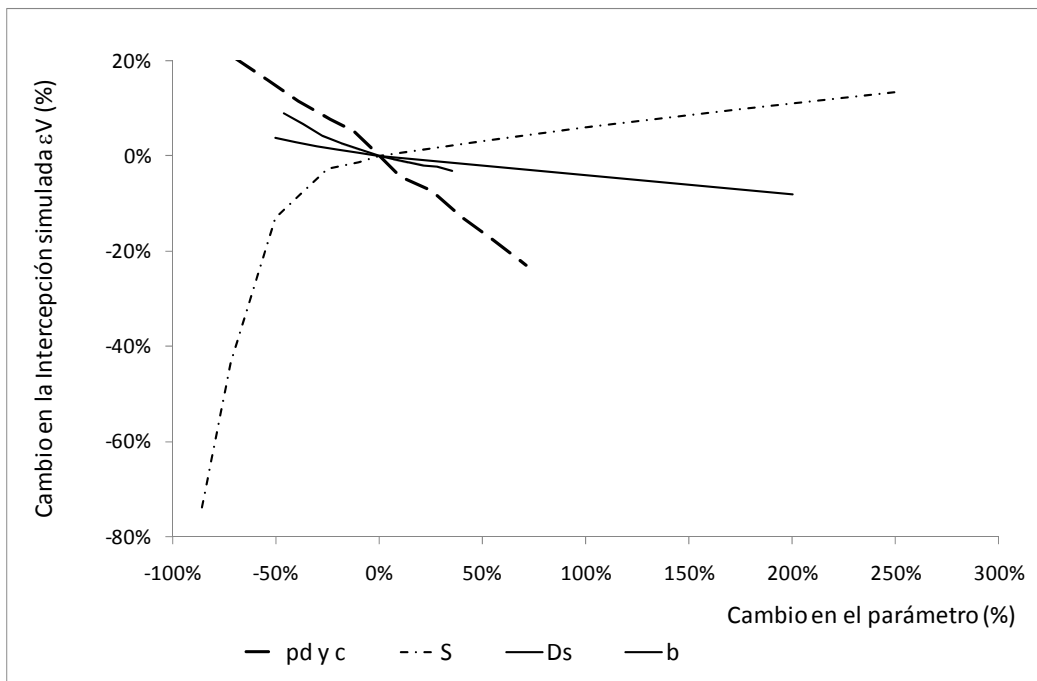


Figura 5.8 Sensibilidad del modelo de Rutter expresada como ϵ_V

Los resultados del análisis de sensibilidad, muestran que ambos modelos son altamente sensibles a variaciones de los parámetros estructurales del dosel: S y p_d , siendo el modelo de Rutter el que mayor sensibilidad muestra a éstos. En particular el modelo de Rutter se muestra más sensible a la disminución del parámetro S que a su aumento, siendo que una reducción de éste al 50% incide en una disminución de la intercepción del 13% mientras que un aumento del 50% del parámetro repercute en un aumento de la intercepción del 3%, por su parte el modelo de Gash responde con variaciones de $\pm 2,7\%$ a iguales modificaciones en el parámetro. Analizando las variaciones del parámetro p_d , se observa que un aumento o disminución del 50% en éste, repercute en forma mayor en la intercepción modelada por Rutter dónde se observa como consecuencia una disminución de 16% y un aumento del 15% respectivamente. El modelo de Gash se muestra algo menos sensible a las mismas variaciones que resultan en una disminución de 18% y un aumento del 6,5% respectivamente.

La sensibilidad de los parámetros estructurales del tronco solo puede analizarse en la modificación del modelo de Gash, resultando que éste es moderadamente sensible a variaciones del parámetro p_f y prácticamente insensible a las variaciones de S_f . Un aumento o una disminución del 50% en el primer parámetro repercute en la simulación de la intercepción con una disminución del 9% y un aumento del 8% respectivamente, mientras que en los rangos analizados para la variación del parámetro S_f el modelo responde con variaciones mínimas de hasta 0,5%.

Con respecto a los parámetros definidos como atmosféricos en el modelo de Gash, la sensibilidad del modelo resulta ser alta para la tasa media de evaporación \bar{E} y moderada para la tasa media de precipitación \bar{P} . En ambos casos es de interés analizar las variaciones que pueden producirse con su aumento, como posible consecuencia del cambio climático. En el primer caso un aumento del parámetro en un 25% repercute en un aumento de 7% en la intercepción, mientras que la tasa media de precipitación tiene una incidencia algo menor y de sentido contrario, ya que un aumento del mismo orden en ésta produce una disminución del 5% en la intercepción.

Finalmente los parámetros que muestran menor incidencia en el modelo de Rutter, son los relacionados al drenaje del dosel: b y D_s . Dicha incidencia, puede caracterizarse como baja en el caso del parámetro b , con variaciones de la intercepción menores a 5%, como respuesta a variaciones de hasta 25% del parámetro, con lo cual puede confirmarse que el modelo es poco sensible a este parámetro.

En resumen ambos modelos son altamente sensibles a los parámetros estructurales del dosel: S y p_d . El modelo de Gash se muestra además altamente sensible a la tasa media de evaporación y moderadamente sensible a la de precipitación, así como moderadamente sensible al parámetro p_f del escurrimiento fustal e insensible al S_f . Por su parte el modelo de Rutter presenta baja sensibilidad respecto a los parámetros del drenaje del dosel: b y D_s .

5.4 Implementación del modelo de Zhang en las microcuencas

El modelo desarrollado por Zhang et al. (1999), detallado en el Capítulo 2, estima la evapotranspiración media anual (ET) basado en sus principales factores de variación: la precipitación, la evapotranspiración potencial y la disponibilidad de agua para la vegetación. Este último factor está representado en el modelo por el parámetro w (ver Ecuación 2.1), coeficiente de disponibilidad de agua para la planta que representa la capacidad de esa vegetación en particular para almacenar agua en la zona radicular para su transpiración.

Las variables de entrada para el modelo de Zhang, son la precipitación anual y la evapotranspiración potencial anual. Implementando este modelo en ambas microcuencas experimentales se estimarán valores del parámetro w , para las dos coberturas bajo estudio: pasturas naturales y plantación de *Eucalyptus*. Para la calibración del parámetro el valor de ET anual estimado será comparado con la evapotranspiración real anual calculada mediante balance hídrico en ambas microcuencas (Silveira et al., 2010b). Los criterios de calibración elegidos son, en orden de prioridad: i) error en el volumen anual EV menor al 5%; ii) error en el volumen acumulado menor al 5%; iii) valor simulado menor al valor observado. Este último criterio se corresponde con la simplificación hecha en el balance hídrico que determina la evapotranspiración real, ya que el término correspondiente a la percolación o recarga a las napas freáticas no fue medido y se encuentra incluido dentro de ésta.

En la Tabla 5.4 se presentan las variables observadas en ambas microcuencas para los tres años de información monitoreada que se estudian.

Tabla 5.4 Variables observadas en las microcuencas de Don Tomás (DT), forestada y La Cantera (LC) pasturas, valores en mm/año [tomado de Silveira et al. (2010b)].

Año hidrológico	Precipitación		Evapotranspiración Potencial (E_0)	Evapotranspiración Real	
	DT	LC		DT	LC
Oct 06 - Set 07	1555	1569	1287	1194	910
Oct 07 - Set 08	941	931	1389	883	689
Oct 08 - Set 09	791	813	1510	801	645

El parámetro w fue estimado en 0,61 con un error acumulado en el volumen de 4,2% para la evapotranspiración real en la microcuenca La Cantera. El valor se considera muy adecuado, tomando como referencia que el valor propuesto por los autores del modelo para pasturas cortas es de 0,5.

Con este valor de w estimado para la pastura se aplica la relación de la Ecuación 2.2, en la microcuenca forestada de Don Tomás, siendo el parámetro f la fracción de superficie forestada de 0,56 (Tabla 3.1). Con el objetivo de calibrar el parámetro w para la cobertura *Eucalyptus*. Sin embargo no se logran valores adecuados del parámetro ya que la simulación subestima fuertemente el valor observado (EV acumulado de 20%) aún para valores del parámetro w un orden mayores que los propuestos para cobertura de bosques.

Se propone por lo tanto la siguiente modificación al cálculo de ET para la cobertura forestal. Debido a que el único factor de variación en la ET que se está considerando corresponde a la diferencia en la capacidad de esa vegetación en particular para almacenar agua en la zona radicular para su transpiración, se propone introducir la intercepción, modelada con Gash, como el segundo factor de variación en el cálculo de ET. De ésta forma la Ecuación 2.1 para el cálculo de ET_f , quedaría:

$$ET_{fm} = \left(\frac{1 + w_f \frac{E_0}{P}}{1 + w_f \frac{E_0}{P} + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{-1}} \right) \cdot P + I \quad \text{Ecuación 5.12}$$

de esta forma la evapotranspiración en la microcuenca forestada se calcula según la actualización de la Ecuación 2.2:

$$ET = f \cdot ET_{fm} + (1 - f) \cdot ET_p \quad \text{Ecuación 5.13}$$

El modelo de Gash implementado previamente en este Capítulo, se aplica a toda la serie medida de precipitación, obteniéndose los siguientes resultados para las componentes de la redistribución en la parcela experimental de Don Tomás:

Tabla 5.5 Simulación de la intercepción con el modelo de Gash, para el total de la precipitación registrada en la parcela experimental de Don Tomás (Oct/06-Set/09).

Año hidrológico	P total (mm/año)	% de la Precipitación total		
		P directa	P fustal	I
Oct 06 - Set 07	1555	75	4	21
Oct 07 - Set 08	941	72	4	24
Oct 08 - Set 09	791	66	4	30

Con esta modificación del modelo de Zhang, que incorpora ahora factores relacionados al dosel forestal a través de la interceptación se obtiene un valor del parámetro w de 2,1 para un EV acumulado de 0,2%. El valor calibrado se considera muy adecuado tomando como referencia que el valor propuesto por los autores del modelo para bosques es de 2. De todas formas se observa que el valor calibrado de w sea probablemente una sobreestimación, ya que se está incluyendo en la estimación de la evapotranspiración el término correspondiente a la percolación.

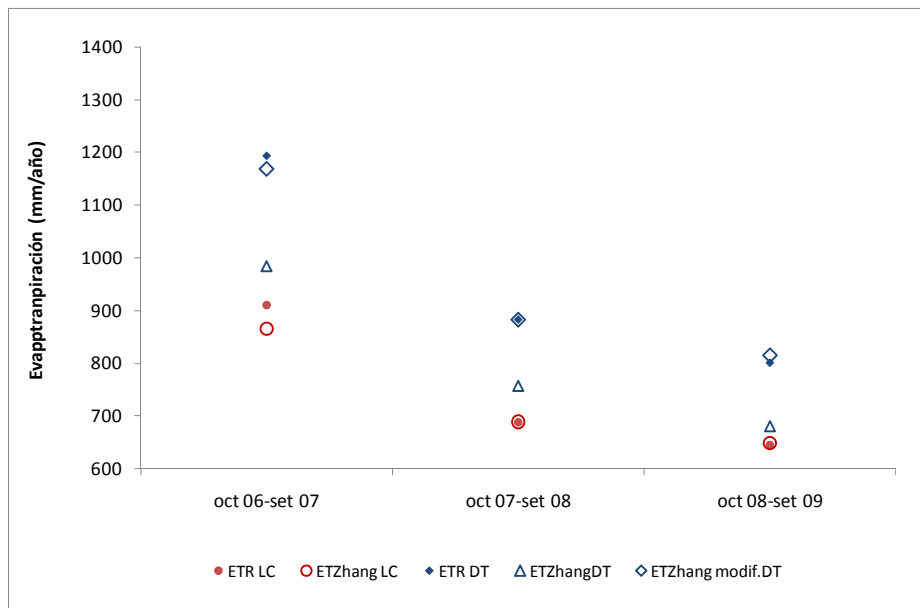


Figura 5.9 Evapotranspiración en las microcuencas, observada y simulada según Zhang

Con esta aplicación se considera validado el modelo de Zhang en las microcuencas experimentales, la validez del modelo en una macrocuenca del Uruguay con 25% de su superficie forestada fue presentada, contrastando con información medida en Silveira y Alonso (2009).

CAPÍTULO 6 – MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS MICROCUENCAS

6 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS MICROCUENCAS

Este Capítulo presenta el avance alcanzado en el estudio de los efectos de la actividad forestal sobre la cantidad del recurso hídrico, mediante la aplicación de un modelo hidrológico de base física y espacialmente distribuido: SHETRAN. En primer lugar se realiza la calibración del modelo SHETRAN en ambas microcuencas y con los parámetros obtenidos se simula la forestación de la microcuenca actualmente bajo pastura. Se presentan también la información de caudal monitoreada en cada microcuenca entre junio de 2006 y diciembre de 2009 y se analizan las relaciones entre ambas series a nivel de eventos así como de volúmenes acumulados. Aún con las limitaciones que implica el corto período de monitoreo y la falta de caracterización física de algunos parámetros del suelo y la vegetación, se logra una aceptable calibración del modelo lo cual permite acercarse a un objetivo más ambicioso: disponer de una herramienta de predicción de los efectos de la forestación para la gestión del recurso hídrico.

6.1 El Modelo Hidrológico SHETRAN

SHETRAN es un modelo de base física espacialmente distribuido, en diferencias finitas, que integra la modelación superficial y subsuperficial incorporando los procesos hidrológicos de movimiento del agua, transporte de sedimentos y transporte de solutos en cuencas (Ewen et al, 2000). Fue desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Newcastle Upon Tyne, basado en el *Système Hydrologique Européen* (Abbott et al., 1986b).

La distribución espacial de las propiedades de la cuenca así como la información de entrada y la respuesta hidrológica se representan en la dirección horizontal mediante una grilla ortogonal y en la vertical mediante columnas con capas verticales en cada elemento de la grilla.

Sus ventajas radican en el significado físico de sus parámetros y en la modelación integrada del flujo superficial y subsuperficial. Su principal desventaja está relacionada a la incertidumbre de la parametrización debida fundamentalmente a: el uso de estimaciones; el efecto de escala y el concepto de equifinalidad. Este último concepto refiere fundamentalmente a la idea de que existen muchos conjuntos de parámetros para una estructura de modelo elegida, que pueden reproducir adecuadamente el comportamiento observado del sistema que se modela (Beven et al. 2001).

Las principales estructuras de cálculo del SHETRAN son las columnas (Figura 6.1). Las redes de canales se modelan como conexiones y el resto de la cuenca como un conjunto de columnas. Cada columna contiene muchas celdas de diferencias finitas, una sobre otra, y cada una debe estar asociada a un tipo de roca, suelo o cobertura vegetal.

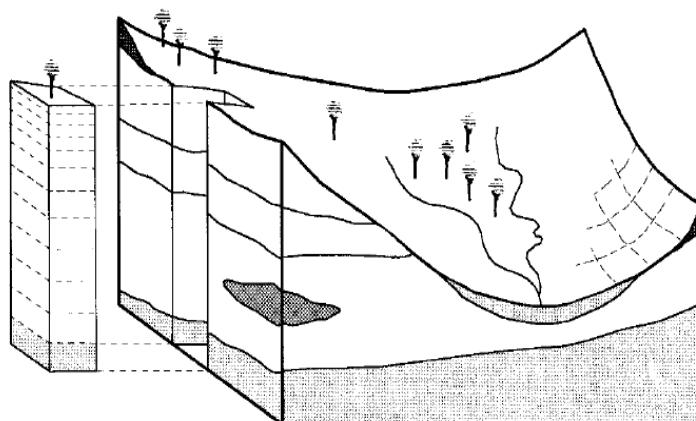


Figura 6.1 Esquema del SHETRAN en columnas y celdas [tomada de Ewen et al. 2000]

Los principales procesos dentro del componente hidrodinámico del SHETRAN están representados por las ecuaciones de la Tabla 6.1, la mayoría de las cuales son ecuaciones en derivadas parciales (Ewen et al., 2000):

Tabla 6.1 Principales procesos y ecuaciones en el componente hidrodinámico del SHETRAN

Proceso	Ecuación
Flujo subsuperficial	Ecuación de flujo variablemente saturado 3D (Parkin, 1996)
Flujo de superficie	Ecuaciones de Saint-Venant (aprox 2D), (Abbott et al., 1986)
Flujo en canales	Ecuaciones de Saint-Venant (aprox 1D), (Abbott et al., 1986)
Intercepción del dosel	Ecuación de Rutter (Abbott et al., 1986)
Evaporación	Ecuación de Penman-Monteith, o como fracción de la evapotranspiración potencial (Abbott et al., 1986)

Para la aplicación del modelo SHETRAN es necesario contar con la siguiente información:

Información de entrada: Series de precipitación y evapotranspiración potencial

Parametros: Propiedades que describen la cuenca, en condiciones normales esto puede incluir:

- Tamaño y posición de las columnas, conexiones de cauce y celdas de diferencias finitas
- Tipo de suelo/roca y profundidad para cada columna
- Uso de suelo/vegetación para cada columna

- Parámetros de drenaje del dosel y capacidad de almacenamiento
- Resistencia del dosel y resistencia aerodinámica
- Distribución en profundidad de la densidad radicular de la vegetación
- Porosidad y almacenamiento específico de los suelos/rocas
- Funciones de potencial matricial de suelos/rocas
- Funciones de conductividad no saturada de suelos/rocas
- Conductividad hidráulica saturada en suelos/rocas
- Condiciones iniciales

Variables: Información de respuesta de la cuenca modelada utilizada para la calibración del modelo o para la validación de la simulación. Normalmente puede incluir alguno de estos datos:

- Ecurrimiento observado
- Niveles de agua subterránea observados
- Intercepción del dosel medida
- Contenido de humedad de suelo medido, etc.

6.2 Calibración del modelo

La información de entrada para implementar SHETRAN fue precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y presión atmosférica, monitoreadas en ambas microcuencas entre Mayo de 2006 y Abril de 2007. La evapotranspiración potencial y la de cada cobertura fueron calculadas mediante la ecuación Penman-Monteith. La precipitación fue ingresada al modelo con paso de cinco minutos y la evapotranspiración con paso horario. Los parámetros del modelo fueron determinados en campo o estimados en base a bibliografía. De esta forma se describieron ambas microcuencas con respecto a: topografía, geología, suelos, vegetación y uso del suelo. La variable de comparación elegida es el escurrimiento superficial a la salida de cada microcuenca. Toda la información necesaria para la implementación así como el monitoreo de las variables está documentada en el Capítulo 3.

Luego de implementar el modelo se efectuaron una serie de simulaciones con el objetivo de determinar el conjunto de parámetros que minimiza la desviación entre las observaciones y las simulaciones. El período de calibración fue de seis meses para ambas microcuencas, entre Noviembre de 2006 y Abril de 2007.

Para evaluar la precisión de la calibración se eligieron dos funciones de calibración: 1) Maximizar el número de Nash; 2) Minimizar la diferencia entre los volúmenes de escurrimiento observados y simulados.

Debido a que cuenta con un solo tipo de cobertura vegetal, La Cantera fue la primer microcuenca que se calibró. Esto hizo posible determinar los parámetros relacionados con la vegetación de pasture y contar con este insumo para la implementación del modelo en la microcuenca de Don Tomás.

En una primera etapa de la calibración se realizaron numerosas simulaciones con el objetivo de conocer la sensibilidad del modelo a los distintos parámetros. Al igual que se documenta en la mayoría de las aplicaciones de SHETRAN revisadas (Bathurst et al, 2004; Lukey et al, 2000; Adams et al, 2005), se encontró que los parámetros más sensibles que definen la forma de los hidrogramas y la relación entre los caudales pico y el flujo base son las características del suelo, principalmente la conductividad saturada, seguida por la porosidad y el coeficiente n de la ecuación de Van Genuchten. La rugosidad de superficie también es un parámetro muy sensitivo que define la forma de los hidrogramas mediante el tiempo base y el tiempo pico.

En una segunda etapa se detectó una deficiencia sistemática en las simulaciones que indicaba que el modelo no era capaz de simular los escurrimientos cuando las condiciones de humedad antecedentes eran bajas y si reproducía ajustadamente el escurrimiento cuando se alcanzaban condiciones de humedad media o alta en los suelos. Considerando el uso actual del suelo en las microcuencas que se describe en el Capítulo 3 y considerando que toda el área ha sido históricamente ocupada con ganado, existe una clara probabilidad de que las capas más superficiales del suelo se encuentren compactadas por el pisoteo del ganado. En la respuesta hidrológica de las cuencas esto puede traducirse como mayores respuestas frente a menores tasas de precipitación, como resultado del descenso de la tasa de infiltración potencial del suelo debida a la compactación. Intentando representar estas condiciones en el modelo se agregó una capa extra al suelo de 20 cm que representa el suelo compactado mediante características de conductividad y porosidad menores a las reportadas en la bibliografía para las características texturales del suelo que se describen en el Capítulo 3. En el corto plazo y con el objetivo de verificar esta hipótesis es necesario mayor trabajo de campo y de laboratorio para la determinación de tasas de infiltración; conductividad hidráulica y porosidad. De todas formas los resultados obtenidos con esta modificación no fueron suficientemente satisfactorios ya que no se representaban bien los picos de los mayores eventos.

La solución final, basada en esta última modificación, incorporó además la modificación de las relaciones tensión – conductividad en el suelo mediante la modificación del coeficiente n en la ecuación de Van Genuchten.

6.3 Resultados

6.3.1 Análisis de la información monitoreada

Se realizó el análisis de doble masa a partir de la información de escurrimiento procesada en forma horaria para las dos microcuencas experimentales, con el objetivo de identificar y analizar la constante de proporcionalidad entre las dos cantidades, así como verificar la consistencia de los datos identificando saltos o cambios de pendiente en las curvas que puedan indicar fallas en las mediciones, y principalmente cambios hidrológicos que afectan la relación entre las variables. De acuerdo a la curva de doble masa pueden definirse cuatro períodos diferentes (Figura 6.2), cuyas características se presentan en la Tabla 6.2.

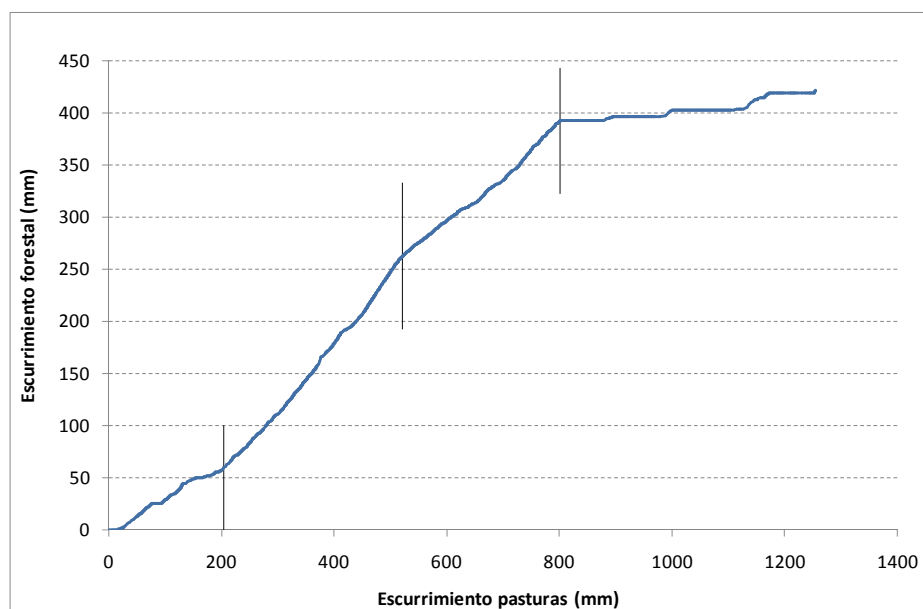


Figura 6.2 Análisis doble masa de escurrimientos observados

Cabe aclarar que los escurrimientos acumulados que se presentan para ambas microcuencas, refieren al período de información disponible en común para ambas series de escurrimiento y no al registro completo.

Tabla 6.2 Períodos del análisis doble masa

Fecha		Escorrentamiento (mm)		Precipitación (mm)		Coeficiente de escorrentía	
desde	hasta	Pastura	Forestal	Pastura	Forestal	Pastura	Forestal
13/06/2006	06/03/2007	204	60	721	765	0.28	0.08
06/03/2007	09/06/2007	317	203	407	390	0.78	0.52
09/06/2007	16/12/2007	279	130	500	491	0.56	0.26
16/12/2007	04/12/2009	279	130	2036	2063	0.22	0.01

El primer periodo del 13/06/06 al 06/03/07 que es el comienzo de la mediciones, existen algunos períodos de información faltante por roturas en el cierre de la microcuenca forestal y comprende la estación octubre/06 a marzo/07 que se caracterizó por eventos de escurrimiento aislados y ausencia de caudal base en la microcuenca forestal, resultando un período seco como muestran los coeficientes de escorrentía. El segundo período del 06/03/07 al 09/06/07 fue el más húmedo en todo el registro existiendo una reducción de la diferencia entre los escurrimientos generados en las microcuencas, resultando en altos coeficientes de escorrentía para ambas. El siguiente período estuvo influenciado por el contenido de humedad antecedente en el suelo y presentó, aun con menores registros de precipitación incidente que para el mismo período del año anterior, mayores flujos base en ambas microcuencas, siendo continuo en la de pasturas y acompañando a los eventos de escurrimiento en la forestal. El último período también es incompleto por falta de información debida a roturas en ambos cierres y períodos de mal funcionamiento de los equipos, siendo que en los períodos comunes de datos se verifican bajos coeficientes de escorrentía, principalmente debidos a las bajas pluviometrías de los períodos abril – setiembre tanto del 2008 como del 2009.

Por último se analizó la relación de los caudales máximos en eventos. Luego de la selección se eligieron treinta y un eventos según los criterios de selección usuales: disponibilidad de información en ambas series, sincronismo del evento entre ambas microcuencas, hidrogramas unimodales, coherencia con la precipitación generadora, etc. En la Figura 6.3 se representa la relación entre ambas series que muestra una tendencia promedio de reducción del 69% en los caudales máximos de la microcuenca forestal con respecto a la pastura. Los eventos representados corresponden en su mayoría a períodos de retorno en torno a un año, los dos mayores que tienen recurrencias de 1,3 y 2 años respectivamente.

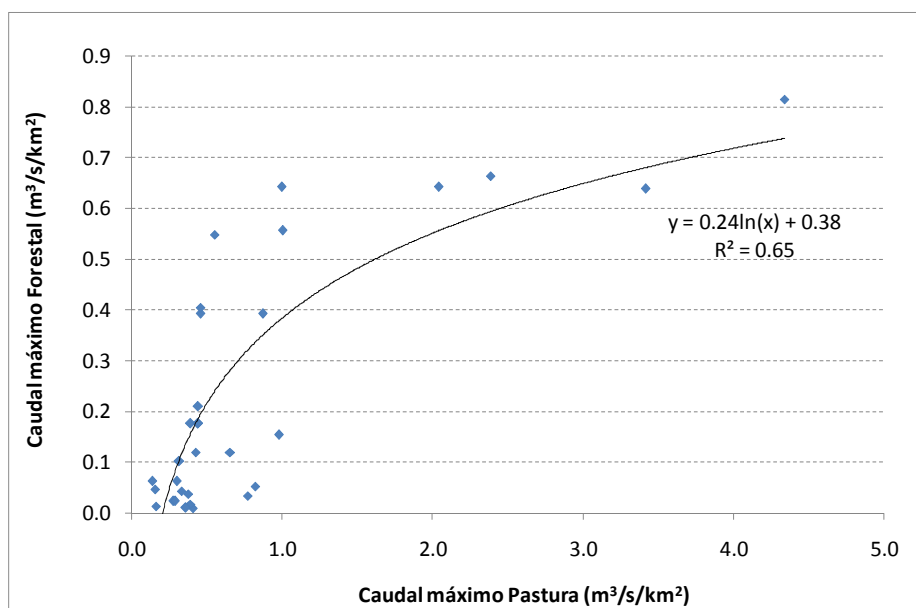


Figura 6.3 Relación entre caudales máximos de eventos

Si bien el período de análisis es relativamente corto para obtener resultados concluyentes, existe una clara tendencia que indica la disminución de la reducción entre los caudales máximos al aumentar el caudal. Este resultado coincide con investigaciones reseñadas en el Capítulo 2 y aporta en el sentido de confirmar que el efecto de la cobertura vegetal del suelo sobre el caudal de escorrentía generado disminuye al aumentar el período de retorno del evento.

6.3.2 Calibración del modelo en las dos microcuencas

Se han logrado valores aceptables para las funciones de calibración, siendo en La Cantera el número de Nash 0.67 y el error en el volumen 4%, mientras que en Don Tomás el número de Nash fue de 0.73 y el error en el volumen 10%. Sin embargo hasta el momento y con las limitaciones que impone la información disponible, la representación de eventos de baja magnitud, no es muy ajustada, como se muestra en los períodos seleccionados para la Figura 6.4 y Figura 6.5.

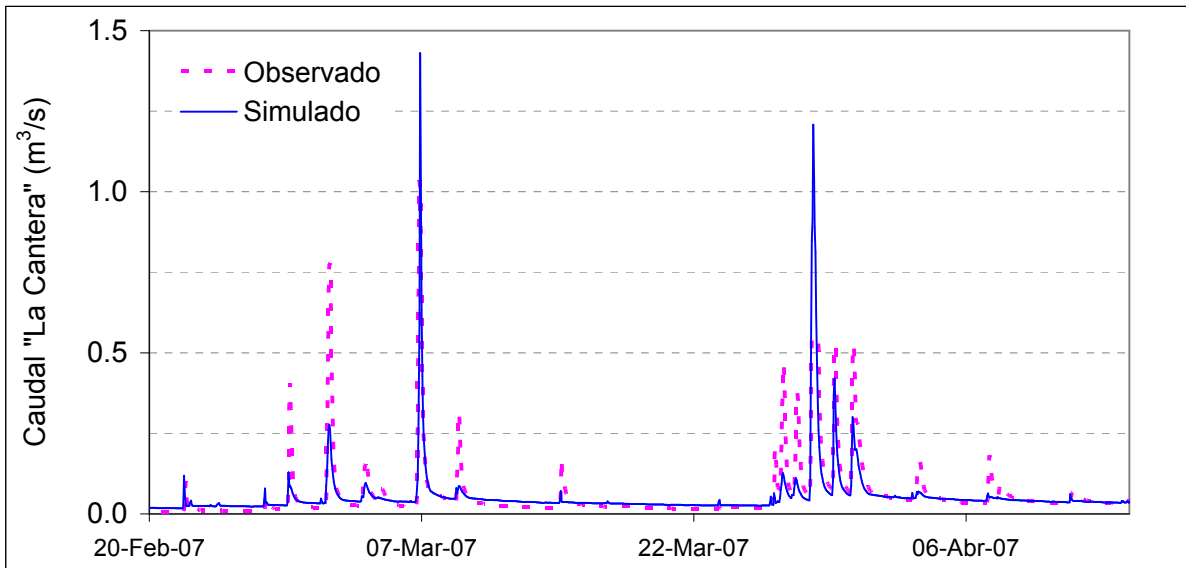


Figura 6.4 Comparación de caudales observados y simulados en La Cantera

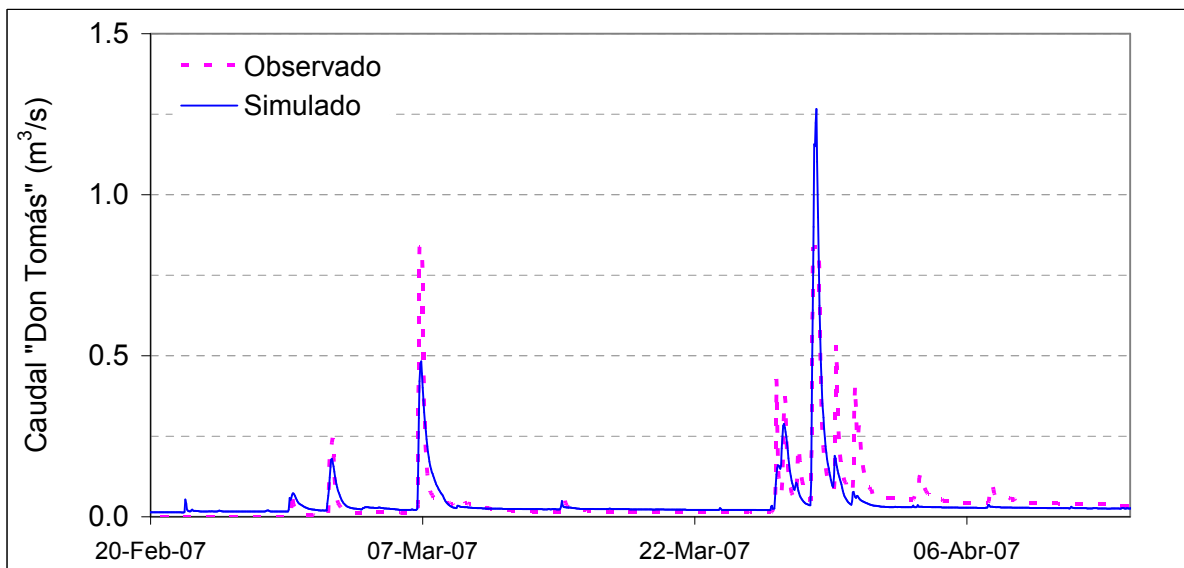


Figura 6.5 Comparación de caudales observados y simulados en Don Tomás

En la Tabla 6.3 y Tabla 6.4 se resumen los principales parámetros obtenidos con la mejor simulación obtenida en cada microcuenca.

Tabla 6.3 Principales parámetros calibrados en La Cantera

Parámetro	Valor de calibración
Conductividad (m/día)	3.2
Porosidad	0.5
Parámetros de Van Genuchten	
n	1.1
a ($\times 10^{-2}$) (cm^{-1})	1.4
Rugosidad ($\text{m}^{1/3} / \text{s}$)	1.5

Tabla 6.4 Principales parámetros calibrados en Don Tomás

Parámetro	Valor de calibración			
	Tipo de suelo			
	1	2	3	4
Conductividad sat. (m/día)	0.44	1.55	0.21	0.83
Porosidad	0.57	0.53	0.63	0.56
Parámetros de Van Genuchten				
n	1.78	1.97	1.37	1.57
a ($\times 10^{-2}$) (cm^{-1})	1.07	1.24	4.58	9.24
Vegetación: <i>Eucalyptus</i>				
Resistencia aerodinámica del dosel (s/m)		4.9		
Resistencia estomática (s/m)		1500 – 100		
Rugosidad ($\text{m}^{1/3} / \text{s}$)		0.4		

6.4 Simulación de la forestación en La Cantera

El objetivo de esta simulación es cuantificar el efecto de la forestación con *Eucalyptus* en el escurrimiento de una microcuenca originalmente cubierta por pasturas, mientras las demás condiciones hidrológicas permanecen inalteradas.

Para lograrlo se simuló, con el modelo SHETRAN, el escurrimiento en la microcuenca de La Cantera para las mismas variables de entrada utilizadas en la calibración, asumiendo que la cobertura vegetal y su distribución espacial será la misma que existe en Don Tomás. Por lo tanto los parámetros de la vegetación para dicha cobertura fueron tomados de la calibración de esa microcuenca, permaneciendo los parámetros correspondientes a suelo y geología incambiados. Para simular el efecto de los árboles como obstáculos al flujo de superficie, la rugosidad superficial se asumió igual a la de Don Tomás.

La comparación de escurrimientos con y sin forestación simulados para La Cantera muestra, como era de esperar, que la forestación produce menores respuestas en los picos e incrementa los tiempos base de los hidrogramas (Figura 6.6). Por otra parte no se aprecian diferencias significativas entre los flujos base.

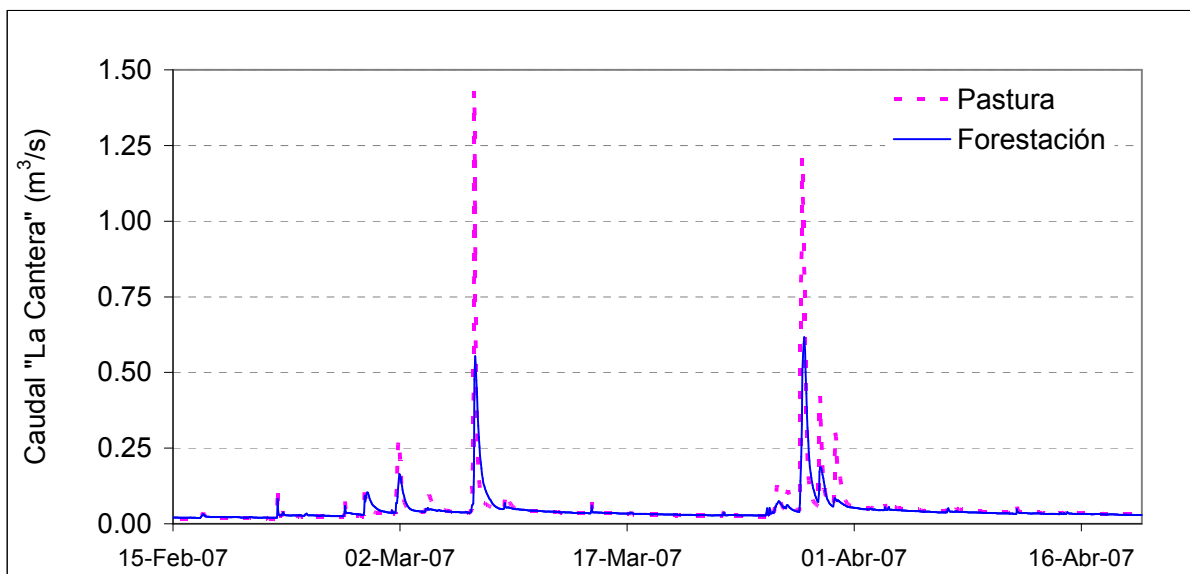


Figura 6.6 Comparación de caudales simulados con pastura y con forestación en La Cantera

En la Tabla 6.5 se resumen los volúmenes escurridos a nivel mensual en ambos casos y se determina el efecto de la forestación sobre la cantidad del recurso hídrico medido como porcentaje de reducción respecto al volumen de la pastura. La tendencia no es clara ya que existen meses en los que se da una reducción y otros un aumento del volumen escurrido, finalmente en el volumen global se aprecia una reducción del 8%, que no es significativa ya que es del mismo orden del error obtenido en las calibraciones.

Tabla 6.5 Diferencias de volumen de escurrimiento en las simulaciones

Fecha	Volumen escurrido (mm/mes)		Diferencia
	Microcuenca La Cantera	Microcuenca Don Tomás	
Jun-06	190	158	17%
Jul-06	79	72	9%
Ago-06	51	50	2%
Sep-06	42	43	-2%
Oct-06	54	59	-9%
Nov-06	64	68	-6%
Dic-06	126	130	-3%
Ene-07	58	63	-9%
Feb-07	46	52	-13%
Mar-07	150	131	13%
Abr-07	57	51	11%
Acumulado	917	877	8%

CAPÍTULO 7 - CONCLUSIONES

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se describieron y cuantificaron de las componentes de la redistribución de la precipitación, en una plantación forestal de *Eucalyptus* ubicada en la región noroeste del Uruguay. A nivel de eventos diarios se observó en la intercepción una tendencia logarítmica decreciente a una asíntota al aumentar la precipitación incidente. Para valores medios de precipitación diaria (20-40 mm) se tiene que la intercepción representa entre 30 y 20% de la precipitación total incidente, mientras que para valores extremos (60-90 mm) ésta se encuentra entre un 18-10%, respectivamente. A nivel anual la intercepción se sitúa entre un 22 y un 27% de la precipitación anual, situándose en el rango superior del intervalo observado en las referencias bibliográficas para otras regiones con pluviometría similar.

En segundo lugar se analizó el desempeño de herramientas clásicas para la modelación del proceso de redistribución: los modelos de Rutter y Gash adaptados a las condiciones locales, adaptación en particular relacionada a la densidad de plantación y características de la especie. En concreto se utilizó la modificación de Gash para dosel ralo.

Ambos modelos resultaron ser altamente sensibles a los parámetros estructurales que definen el almacenamiento y el coeficiente de atravesamiento libre del dosel (S y p_d). El modelo de Gash se muestra además altamente sensible a la tasa media de evaporación y moderadamente sensible a la de precipitación lo cual es indicativo de la incidencia que el cambio climático acompañado de elevación en la temperatura media y aumento en la intensidad de las precipitaciones tendría sobre esta componente del ciclo hidrológico. Por otro lado este modelo se muestra moderadamente sensible al parámetro de atravesamiento libre del escurrimiento fustal (p_f) e insensible al almacenamiento en los troncos (S_f). Por su parte el modelo de Rutter presenta baja sensibilidad respecto a los parámetros del drenaje del dosel (b y D_s).

La aplicación del modelo de Gash resultó en primer lugar en una modificación del módulo de estimación del escurrimiento fustal ya que el cálculo original sobreestima fuertemente los valores observados en las condiciones locales. Se observó que la causa probable de esto está ligada a las altas tasas de precipitación media locales, en referencia a las observadas en los sitios donde este módulo del modelo reporta un buen ajuste. Claramente las condiciones de menor intensidad en la precipitación favorecen el aumento del almacenamiento, tanto en el dosel como en los troncos, siendo al parecer en este rango más sensible la segunda componente, con lo cual intensidades de precipitación mayores conducen a un mayor escurrimiento fustal y una menor evaporación desde los fustes. Otra característica, que aparece en segundo lugar es que la relación entre los parámetros del escurrimientos fustal (S_f y p_f), resulta en el sitio estudiado hasta un orden menor que en los sitios de la bibliografía de referencia, con lo cual aumenta la cantidad de eventos para los cuales se da la evaporación desde los troncos contribuyendo así al aumento en la estimación de la evaporación desde los fustes. Se introdujo entonces una modificación en este módulo del modelo según la cual la precipitación fustal ocurrirá cuando la precipitación supere el mismo límite definido por Gash et al. (1995) pero será modelada según la relación obtenida de la regresión entre las observaciones de precipitación total y precipitación fustal.

Mediante la implementación del modelo de Gash se obtuvo además la calibración y validación del modelo utilizado para el cálculo de la evaporación desde el dosel forestal. Originalmente ésta se realiza según la ecuación de Penman Monteith, con la resistencia aerodinámica calculada en forma simplificada mediante la transferencia de *momentum* únicamente. Se obtuvieron resultados ligeramente superiores al introducir en el cálculo de la resistencia aerodinámica una formulación más general propuesta por Lankreijer et al. (1993), que considera la resistencia aerodinámica a la transferencia de calor y no solo al *momentum*, la cual estos autores consideran más apropiada en condiciones húmedas, con este resultado entonces se introdujo una segunda modificación del modelo propuesto por el autor.

Por otro lado la implementación del modelo de Rutter modificado por Abbott et al. (1986) permitió calibrar la relación de proporcionalidad entre el parámetro de almacenamiento del dosel forestal (S) y el índice de área foliar (IAF). Con esto se logra una forma de estimación del parámetro más relevante para los modelos de redistribución de la precipitación, que se independiza de la necesidad del monitoreo de las componentes y lo sustituye por la estimación del IAF.

Se implementaron además dos metodologías para la estimación del IAF, la primera mediante medición directa del área foliar de un ejemplar realizada únicamente con valor testimonial, y la segunda mediante la aplicación del método de medición indirecta a través de la fotografía hemisférica del dosel. El método requiere de la adquisición de imágenes mediante un lente hemisférico del tipo “ojo de pez” que luego son procesadas mediante software de análisis de imágenes que las traducen en imágenes binarias (cielo – dosel) a partir de las cuales se estima la fracción de cielo visible (*gap*) y con ello finalmente el IAF. Existen dos puntos importantes en la aplicación de esta metodología que fueron tenidos en cuenta: el tiempo de exposición del film al tomar la fotografía y la elección del umbral de segmentación de la imagen para lograr la separación entre el primer plano (dosel) y el fondo (cielo). Para el procesamiento de las imágenes se utilizaron los softwares libres GLA (Frazer et al., Canada-USA, 1999) y SideLook (Nobis, 2005). Los resultados obtenidos con esta metodología muestran una distribución espacial homogénea del dosel, exceptuando los sitios ubicados cerca del límite exterior del rodal. Además y como parecía esperable, dentro de un mismo sitio se presentaron mayores valores de IAF en las ubicaciones correspondientes a las filas y menores en las entrefilas, sin embargo, analizadas ambas series de datos, la diferencia entre sus valores medios no resultó estadísticamente significativa. Se considera por tanto representativo del rodal el valor medio de la serie de muestras de IAF estimadas mediante la metodología de la fotografía hemisférica, siendo éste $1,82 \pm 0,27$ (valor medio \pm desviación estándar).

Respecto a esta primer línea del trabajo las perspectivas de trabajo futuro están centradas en primer lugar en la validación de los modelos implementados en un mayor período de tiempo de monitoreo que permita incluir un rango de condiciones más amplio, en particular en lo referente a la intensidad de los eventos de precipitación. En segundo lugar incorporar la variación temporal de los parámetros del dosel forestal, especialmente del almacenamiento y el IAF, con la edad de la plantación para lo cual es necesario el seguimiento de al menos un rodal durante su etapa de mayor crecimiento: entre

el primer y el octavo año. A más largo plazo sería recomendable plantear modelaciones similares para la segunda especie exótica predominante en el Uruguay: *Pinus*.

El segundo objetivo del trabajo realizado era el de incorporar las herramientas anteriores como insumo para la modelación hidrológica. En una primera aproximación, este objetivo se logró mediante la implementación del modelo de Zhang para la estimación de la evapotranspiración en las microcuencas de estudio. En esta implementación se introdujo una modificación en el modelo original de Zhang, incorporando una componente debida a la intercepción de la precipitación la cual se estima mediante la aplicación del modelo de Gash calibrado anteriormente, lográndose un muy buen ajuste y la calibración del parámetro del modelo de Zhang para ambas coberturas estudiadas, estimándose éste en 0,61 para pasturas y 2,1 para plantación de *Eucalyptus*, valores más que apropiados teniendo en cuenta que la recomendación de los autores del modelo es de 0,5 para pasturas y 2 para bosques. Queda planteado como línea futura de trabajo la implementación a escala de macrocuencas de este modelo así modificado, como herramienta simple para la cuantificación de las variaciones en la evapotranspiración asociados al cambio de la superficie forestada, a nivel de cuenca. Los resultados en esta línea son auspiciosos ya que existen estimaciones preliminares ajustadas (Silveira y Alonso, 2009).

Una segunda aplicación, más ambiciosa, consistió en la incorporación de los resultados de las componentes de la redistribución de precipitación y los parámetros estructurales del dosel forestal en la modelación hidrológica del tipo distribuido, lo cual posibilita predecir el impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos para diferentes escenarios de crecimiento del sector. El avance logrado en este sentido, a partir de la implementación del modelo hidrológico SHETRAN en las dos microcuencas del área de estudio, consistió en centrar la atención en los principales procesos y parámetros que describen la hidrología de estas microcuencas y gracias a ello estar en condiciones de obtener un mejor aprovechamiento de las posibilidades del modelo SHETRAN en el corto plazo. El modelo SHETRAN fue calibrado con aceptable eficiencia en las dos microcuencas bajo estudio. A partir de estos resultados fue posible realizar la simulación de la forestación con *Eucalyptus* de una microcuenca y evaluar los efectos de este cambio de uso del suelo en la disponibilidad de los recursos hídricos. En los resultados preliminares se visualiza claramente la reducción de la respuesta de la cuenca a eventos de precipitación así como también cierta reducción en los escurrimientos totales. Sin embargo era esperable encontrar mayores reducciones en los flujos base y los escurrimientos totales. La explicación puede radicar en que las calibraciones previas hayan estado excesivamente centradas en los parámetros relacionados a las características del suelo y no diferenciaron suficientemente los parámetros de las distintas coberturas vegetales, lo cual se relaciona con el concepto de equifinalidad que explica cómo a partir de múltiples juegos de parámetros se puede obtener un mismo resultado final en la simulación. Sin duda se requiere continuar trabajando para alcanzar mejores resultados tanto en la simulación del escurrimiento como en la simulación de los procesos internos de la cuenca, en particular: almacenamiento de agua en el suelo y percolación a los distintos niveles de acuífero. Para ello es imprescindible un mayor período de datos relevados, para contar con un período de calibración más extenso y mejorar la calidad de las simulaciones. Igualmente resulta notoria la necesidad de trabajar sobre la

caracterización física de los parámetros, tanto de la vegetación: mediante determinaciones del LAI (índice de área foliar) en las distintas edades de la plantación de *Eucalyptus*; como trabajo de laboratorio en la caracterización física de los suelos, para de esa forma acotar la variación de los parámetros relacionados.

CAPÍTULO 8 - BIBLIOGRAFÍA

8 BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE" 2: Structure of a physically based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87: 61-77.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE" 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87: 45-49.
- Aboal, J.; Jimenez, M.S.; Morales, D. y Hernandez, J.M. (1999). Rainfall interception in laurel forest in the Canary Islands. *Agricultural and Forest Meteorology* 97, 73-86
- Abtew, W., Gregory, J.M., Borrelli, J. 1989. Wind profile: estimation of displacement height and aerodynamic roughness. *American Society of Agr. Eng.*, 32(2): 521-527.
- Adams, R., Parkin, G., Ibbitt, R.P., Elliott, A.E. and Rutherford, J.C. (2005). Using a rainfall simulator and a physically-based hydrological model to investigate runoff processes in a hillslope. *Hydrological Processes*, 19, 2209-2223
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO. Irrigation and Drainage Paper*, Nº 56. 300 p.
- Andréassian, V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291:1-27.
- Aussenac G, C Boulangeat. 1980. Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Anuales des Sciences Forestières* 37(2): 91-107.
- Bathurst J C, Ewen J, Parkin G, O'Connell P E and Cooper J D (2004) Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 3. Blind validation for internal and outlet responses *Journal of Hydrology*, 287, 74-94
- Bathurst, J.C. (1986). Sensitivity analysis of the Systeme Hydrologique Europeen for an upland catchment. *Journal of Hydrology*, 87, 103-123.
- Beven, K., Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology* 249, 11-29.
- Bosch J. M., Hewlett J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yields and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55:3-23.
- Bossi, J., L. A. Ferrando, J. Montaña, N. Campal, H. Morales, F. Gancio, A. Schipilov, P. Sprechman y D. Piñeyro, 1998. Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000 - 1998. Geoeditores S.R.L., Montevideo, 1p.
- Calder, I.R. 1986 what are the limits on forest evaporation? – A further comment. *Journal of Hydrology*, 89: 33-36
- Calder, I.R. 2007. Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251: 110–120.

- Calder, I.R., Hofer, T., Vermont, S. y Warren, P. 2007. Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. *Unasylva* 229, Vol. 58, 2007.
- Calder, I.R. (1992). The hydrological impact of land-use change (with especial reference to afforestation and deforestation). En *Proceedings of the Conference of Priorities for Water Resources Allocation and Management*, Natural Resources and Engineers Advisers Conference, Southampton, July 1992: 91-101
- Calder, I.R. (2005). *The Blue Revolution: Integrated Land and Water Resource Management*. Earthscan Publications, Londres. Segunda Edición.
- Calder, I.R., Rosier, P., Prasanna, K.T., Parameswarappa, S. 1997. Eucalyptus water use greater than rainfall input – a possible explanation from southern India. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(2):249–256.
- Calder, I.R., Hall, R.L., Prasanna, K.T. (1993). Hydrological impact of Eucalyptus plantation in India. *Journal of Hydrology*, 150:635-648.
- Cescatti, A. 2007. Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs Methodology and comparison with standard thresholding techniques. *Agricultural and Forest Meteorology* 143: 1–12.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1994). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, Singapore.
- Crockford R.H., Richardson D.P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14: 2903-2920
- Crockford RH, Richardson D.P. (1990). Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in southeastern Australia: IV. The relationship of interception and canopy storage capacity, the interception of these forests, and the effect on interception of thinning the pine plantation. *Hydrological Processes* 4: 169-188.
- Cuartas, L.A., Tomasella, J., Donato Nobre, A., Hodnett, M.G., Waterloo, M.J., Múnera, J.C. 2007. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology* 145: 69–83.
- David, T.S., Gash, J.H.C., Valente, F., Pereira, J. S., Ferreira, M.I. y David, J. S. 2006. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes* 20, 2713-2726.
- Deguchi, A. , Hattori, S. y Park, HT. 2006. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology* 318: 80–102.
- Ewen, J., Parkin, G., O’Connell, P.E. (2000) SHETRAN: Distributed river basin flow and transport modelling system. *Journal of Hydro Engineering*, 3, 250-258.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. FAO, Roma, Colección Montes Nº 11, 677p.
- Ford, E.D. y Deans, J.D. (1978). The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 15: 901-917.
- Gash, J. (1979). An analytical model of rainfall interception by forest. *Quart. J. R. Soc.*, 105, pp 43-55.
- Gash, J. H. C., Morton, A. J. (1978). An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *Journal of Hydrology*, 38, 49-58.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R., Lachaud, G. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170:79-86.

- Gash, J.H.C., Wright, I.R., Lloyd, C.R. (1980). Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 48:89-105.
- Genta, J.L.; Failache, N.; Alonso, J.; Bellón, D. 2001. "Balances Hídricos Superficiales en cuencas del Uruguay". DNH-IMFIA-UNESCO/PHI
- Greenwood, E.A.N., Beresford, J.D., Bartle, J.R. and Barron, R.J.W., 1982. Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique. IV. Evaporation from a regenerating forest of Eucalyptus wandoo on land formerly cleared for agriculture. *Journal of Hydrology*, 58: 357-366.
- Gush MB, Scott DF, Jewitt GPW, Schulze RE, Hallowes LA, Gørgens AHM. 2002. A new approach to modeling streamflow reductions resulting from commercial afforestation in South Africa. *Southern African Forestry Journal* 196: 27–36.
- Herbst, M., Roberts, J.M., Rosier, P., Gowing, D.J. 2006. Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. *Agricultural and Forest Meteorology* 141: 244–256.
- Herbst, M., Rosier, P., McNeil, D., Harding, R.J., Gowing, D.J. 2008. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1655–1667.
- Holwerda, F., Barradas, V.L., Cervantes, J., Bruijnzeel, L.A. (2007). Balances hídrico y de energía de un cafetal de sombra en el centro de Veracruz, México. En Reporte Técnico Final del proyecto INE/A1-064/2007. Instituto de Ecología, A.C. – Vrije Universiteit Ámsterdam – Instituto Nacional de Ecología. Xalapa, Ver., México.
- Huber A, D López. 1993. Cambios en el balance hídrico provocados por la tala rasa de un rodal adulto de Pinus radiata (D. Don). *Bosque* 14(2), Valdivia, pp 11-18.
- Huber A, P Barriga, R Trecaman. 1998. Efecto de la densidad de plantaciones de Eucalyptus nitens sobre el balance hídrico en la zona de Collipulli, IX Región (Chile). *Bosque* 19(1), Valdivia, pp 61-69.
- Huber, A., Iroumé, A. 2001. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology* 10(1-4):78-92
- Inoue, A., Yamamoto, K., Mizoue, N., Kawahara, Y., 2004. Effect of different image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 126, 89–97.
- Iroumé A., Huber A. 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a Pseudotsuga menziesii plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrological Processes* 16(12): 2347-2361.
- Iroumé, A. y A. Huber. 2000. Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque* 21(1), Valdivia, pp. 45-56.
- Iroumé, A; Mayen, O., Huber, A. 2006. Runoff and peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile. *Hydrological Processes* 20(1):37-50.
- Jetten, V.G. 1996. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes*, 10: 671-685.
- Jonckheere, I, Fleck, S, Nackaerts, K, Muysa, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F. (2004). "Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography." *Agric. For. Meteorol.* 121: 19–35

- Jonckheere, I, Fleck, S, Nackaerts, K, Muysa, B., Coppin. 2005. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 132: 96–114
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., Link, T.E., Iroumé, A. 2004. A Stochastic model of throughfall for extreme events. *Hydrology and Earth System Science*, 8(1): 23-34.
- Lankreijer H.J.M., Hendriks M.J., Klaassen W. (1993). A comparison of models simulating rainfall interception of forests. *Agric. For. Meteorol.*, 64: 187:199.
- Law, F. 1958. Measurements of rainfall, interception and evaporation losses in a plantation of Sitka spruce trees. En *IAHS General Assembly*, Toronto, vol 2: 397-411. IAHS Publ. 44, IAHS Press, Walingford, Reino Unido.
- Leyton, L., Reynolds, E. R., Thompson, F. B. (1967). Rainfall interception in forest and moorland. W. E. Sopper and H. W. Lull (Ed), *Forest Hydrology Pergamon*, Oxford, pp 163-178.
- Likens, G. E., Eaton, J. S. A polyurethane stemflow collector for trees and shrubs. *Ecology*, v. 51, n. 5, p. 938-939, 1970.
- Limousin, J.M., Rambal, S., Ourcival, J.M. y Joffre, R. 2008. Modelling rainfall interception in a Mediterranean Quercus ilex ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment. *Journal of Hydrology* 357: 57– 66.
- Link, T. Unsworth, M., Marks, D. 2004. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agric.For. Meteorol.* 124: 171–191
- Liu, J. 1988. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, 42:111-123.
- Lloyd C.R., Gash J.H.C., Shuttleworth W.J. y Marques F. A. de O. 1988. The measurement and modeling of rainfall interception by Amazonian rain forest. *Agric. For. Meteorol.* 43:277-294.
- López C, C Blanco. 1978. Hidrología Forestal. Segunda Parte. Madrid, España. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 134 p.
- Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A. 1992. Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of Gash's analytical model of interception. *Journal of Hydrology*, 138: 469--485
- Lukey, B.T., Sheffield, J., Bathurst, J.C., Hiley, R.A. and Mathys, N. (2000) Test of the SHETRAN technology for modeling the impact of restoration on badlands runoff and sediment yield at Draix, France. *Journal of Hydrology*, 235, 44-62.
- Martino, D., Bennadji, Z., Fossati, A., Pagliano, D., Van Hoff, E. (1997). La forestación con eucaliptos en Uruguay: su impacto sobre los recursos naturales y el ambiente. Serie Técnica 88. INIA La Estanzuela.
- Macfarlane, C., Grigg, A., Evangelista, C. 2007a. Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: Thinking inside the circle. *Agric. For. Meteorol.* 146: 1–12
- Macfarlane, C., Hoffman, M., Eamus, D. Kerp, N., Higginson, S., McMurtrie, R., Adams, M. 2007b. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agric. For. Meteorol.*, 143: 176–188.
- Monteith, J.L., (1965), "Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organisms". *Symposium of the Society of Experimental Biologists*, vol. 19, 205-234.

- Munka, C. 2010. *Variación del índice de área foliar y de la evapotranspiración en Pinus taeda debido al manejo silvicultural*. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay. 78p.
- Murakami, S. 2007. Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. *Journal of Hydrology* 342: 305– 319.
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo, F. y Gash, J.H.C. 2009. A review of rainfall interception modeling. *Journal of Hydrology*, 370 (2009) 191–206
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part 1 - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
- Nobis, M. (2005). *SideLook 1.1 - Imaging software for the analysis of vegetation structure with true-colour photographs*. <http://www.appleco.ch>.
- Nobis, M., Hunziker, U. 2005. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agric. For. Meteorol.*, 128 (2): 243-250.
- Panario, D., Mazzeo, N., Eguren, G., Rodríguez, C., Altesor, A., Cayssials, R., Achkar, M. 2006. Síntesis de los efectos ambientales de las plantas de celulosa y del modelo forestal en Uruguay. Informe solicitado por el Consejo de la Facultad de Ciencias. Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- Parkin, G. (1996). A three-dimensional variably-saturated subsurface modelling system for river basins. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne.
- Paula Lima, W. 2008. Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba – São Paulo.
- Paula Lima, W. 1984. The hydrology of eucalypt forests in Australia – a review. IPEF n.28, p.11-32
- Pearce, A.J. y Rowe L.K. 1981. Rainfall interception in a multi-storied, evergreen mixed forest: estimates using Gash’s analytical model. *Journal of Hydrology*, 49: 341-353.
- Peel M.C., McMahon T.A., Finlayson B.L. y Watson F.G.R. 2002. Implications of the relationship between catchment vegetation type and the variability of annual runoff. *Hydrol. Process.* 16, 2995–3002
- Penmann, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Soc. London A* 193, 120-145.
- Perez Arrarte, C. 2007. Plantaciones forestales e impactos sobre el ciclo del agua: un análisis a partir del desarrollo de las plantaciones forestales en Uruguay. Grupo Guayubira – SSNC. Montevideo Uruguay. ISBN: 978-9974-8030-0-8.
- Petraglia, C., Dell’Acqua, M. (2006). Actualización de la carta forestal del Uruguay con imágenes del año 2004. Ministerio de Ganadería agricultura y Pesca. Sistema de Información Geográfica de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables. Noviembre, 2006.
- Pook EW, Moore PHR. 1991. Rainfall interception by trees of *Pinus radiata* and *Eucalyptus viminalis* in a 1300 mm rainfall area of southeastern New South Wales: I. Gross losses and their variability. *Hydrological Processes* 5: 127-141.

- Rutter, A.J. y Morton, A.J. 1977. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *J. appl Ecol.* 14, 567-588
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C., Morton, A.J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* 9:367-384.
- Rutter, A.J., Morton, A.J. Robins, P.C. 1975. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl Ecol.* 12, 367-380.
- Scott DF, Lesch W. 1997. Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. *Journal of Hydrology* 199:360–377.
- Scurlock, J. M. O., Asner, G. P. y Gower, S. T. 2001. Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932–2000. ORNL/TM-2001/268. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn.
- Shi, Z., Wang, Y., Xu, L., Xiong, W., Yu, P. Gao, J., Zhang, L. 2010. Fraction of incident rainfall within the canopy of a pure stand of *Pinus armandii* with revised Gash model in the Liupan Mountains of China. *Journal of Hydrology* 385: 44–50.
- Silveira, L. En Prensa. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo. Serie Técnica INIA.
- Silveira, L.; Schipilov, A., Crisci, M.; Alonso, J.; Martínez, L.; Symonds, S.; Chreties, C. 2010a. Recuperación de acuíferos en dos microcuencas (pasturas-plantación de *Eucalyptus*) del Uruguay. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. 2010.
- Silveira, L.; Crisci, M.; Alonso, J.; Martínez, L.; Symonds, S.; Chreties, C. 2010b. Comparación del balance hídrico en dos microcuencas (pasturas-plantación de *Eucalyptus*) del Uruguay. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. 2010.
- Silveira, L; Alonso, J. 2009. Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrological Processes* 23, 320–329.
- Silveira, L., Alonso, J. Martínez, L. 2006. Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Revista Agrociencia*, Facultad de Agronomía, Vol. X N° 2 pág. 75 – 93.
- Teske, M., Thistle, H., 2004. A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecology and Management*, 198: 341-350.
- USDA - Soil Survey Division Staff. (1993). Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Valente, F., David, J.S., Gash, J.H.C. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190:141-162.
- Van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *Journal of Hydrology*, 247: 239-262.
- Van Dijk, A.I.J.M., Keenan, R.J., 2007. Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management* 251:1-9.

-
- Wallace, J. y McJannet, D. 2006. On interception modelling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. *Journal of Hydrology* 329: 477– 488.
- Watson, D., 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11: 41-76.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I, Coppin, P. 2004. "Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling." *Agric. For. Meteorol.*, 121: 37–53.
- Whitehead, D., Beadle, C.L. 2004. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. *Forest Ecology and Management*, 193: 113-140.
- Wieringa, J. 1992. Updating the Davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics*, 41-44 (1992) 357-368.
- Wieringa, J. 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary Layer Meteorology*, 63: 323-363.
- Zeng, N., Shuttleworth, J.W., Gash, J.H.C. 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis. *Journal of Hydrology* 228: 228–24.
- Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology CSIRO Land and Water. Technical report 99/12, November, 1999.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3):701-708.
- Zhang, Y., Chen, J. M., Miller, J. R. 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agric. For. Meteorol.*, 133: 166-181.
- Zinke, P. J. 1967. Forest interception studies in the United States. In: W. E. SOPPER and H. W. LULL (Editors), *Forest Hydrology*. Pergamon, Oxford, pp.137-161.

ANEXO - PUBLICACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DEL TRABAJO DE TESIS

9 ANEXO – PUBLICACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DEL TRABAJO DE TESIS

Se presentan en este Anexo las publicaciones presentadas en el transcurso del trabajo realizado para esta Tesis. En ellas se resume i) el trabajo de modelación hidrológica espacialmente distribuida en las microcuencas experimentales de estudio; ii) resultados intermedios de la modelación de redistribución de la precipitación y su relación con el índice de área foliar; iii) análisis de las relaciones precipitación-escorrentía a nivel de macrocuencas en Uruguay, que incorporan estimaciones de evapotranspiración realizadas con el modelo de Zhang et al. (1999).

- i) Alonso, J.; Silveira, L. Modelación del cambio de uso del suelo en microcuencas experimentales en Uruguay: validación del modelo SHETRAN. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2008, Cartagena de Indias, Colombia. 2008
- ii) Alonso, J.; Silveira, L.; Martínez, L.; Crisci, M.; Symonds, S. Incorporación del IAF en modelos de redistribución de precipitación. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. 2010.
- iii) Silveira, L; Alonso, J. 2009. Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrological Processes* 23, 320–329.