

# **EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD FORESTAL SOBRE LOS RECURSOS SUELOS Y AGUAS**

## **PROYECTO FPTA-210 EFECTO DE LA ACTIVIDAD FORESTAL SOBRE LOS RECURSOS SUELOS Y AGUAS, EN MICROCUENCAS SIMILARES SOMETIDAS A DISTINTO MANEJO**

**Editor del Proyecto:** Ing. Luis Silveira, Ph.D

**Equipo técnico:** **Facultad de Ingeniería** Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA): Ing. Luis Silveira, Ph.D.; Ing. Christian Chreties, M.Sc.; Ing. Jimena Alonso; Ing. Carlos Amorín; Ing. Pedro De Izaguirre; Ing. Magdalena Crisci; Ing. Santiago Symonds.

**Facultad de Agronomía** Departamento de Suelos y Agua (DSyA): Ing. Agr. Leticia Martínez; Ing. Agr. Mario García, Ph.D.; Ing. Agr. Fernando García, Ph.D.; Ing. Agr. Silvana Delgado; Ing. Agr. Carlos Clérico; Ing. Agr. Lisette Bentancor; Ing. Agr. Mariana Hill; Ing. Agr. Florencia Alliaume.

**Facultad de Ciencias** Centro de Investigaciones Nucleares (CIN) Dr. Pablo Cabral; Q. F. Paola Audicio.

**Universidad Austral de Chile** Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales: Dr. Ing. Andrés Iroumé; Dr. Ing. Anton Huber.

**Consultor:** Lic. Alejandro Schipilov (ex docente de Facultad de Agronomía).

**Título:** Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas

**Director de Proyecto:** Ing. Luis Silveira, Ph.D.

**Equipo técnico:** Ing. Luis Silveira, Ph.D.; Ing. Christian Chreties, M.Sc.; Ing. Jimena Alonso; Ing. Carlos Amorín; Ing. Pedro De Izaguirre; Ing. Magdalena Crisci; Ing. Santiago Symonds; Ing. Agr. Leticia Martínez; Ing. Agr. Mario García; Ph.D. Ing. Agr. Fernando García Ph.D.; Ing. Agr. Silvana Delgado; Ing. Agr. Carlos Clérico; Ing. Agr. Lisette Bentancor; Ing. Agr. Mariana Hill; Ing. Agr. Florencia Alliaume; Dr. Pablo Cabral; Q. F. Paola Audicio; Dr. Ing. Andrés Iroumé; Dr. Ing. Anton Huber; Lic. Alejandro Schipilov

**Serie:** FPTA N° 32

© 2011, INIA

ISBN: 978-9974-38-331-9

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA

Andes 1365, Piso 12. Montevideo - Uruguay  
<http://www.inia.org.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Esta publicación no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

# INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA

---

## INTEGRACIÓN DE LA JUNTA DIRECTIVA

**Ing. Agr., MSc. Enzo Benech** - Presidente

**Ing. Agr., Dr. Mario García** - Vicepresidente



**Dr. Pablo Zerbino**

**Dr. Alvaro Bentancur**



**Ing. Agr., MSc. Rodolfo M. Irigoyen**

**Ing. Agr. Mario Costa**





## FONDO DE PROMOCIÓN DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) fue instituido por el artículo 18° de la ley 16.065 (ley de creación del INIA), con el destino de financiar proyectos especiales de investigación tecnológica relativos al sector agropecuario del Uruguay, no previstos en los planes del Instituto.

El FPTA se integra con la afectación preceptiva del 10% de los recursos del INIA provenientes del financiamiento básico (adicional del 40/00 del Impuesto a la Enajenación de Bienes Agropecuarios y contrapartida del Estado), con aportes voluntarios que efectúen los productores u otras instituciones, y con los fondos provenientes de financiamiento externo con tal fin.

EL FPTA es un instrumento para financiar la ejecución de proyectos de investigación en forma conjunta entre INIA y otras organizaciones nacionales o internacionales, y una herramienta para coordinar las políticas tecnológicas nacionales para el agro.

Los proyectos a ser financiados por el FPTA pueden surgir de propuestas presentadas por:

a) los productores agropecuarios, beneficiarios finales de la investigación, o por sus instituciones.

b) por instituciones nacionales o internacionales ejecutoras de la investigación, de acuerdo a temas definidos por sí o en acuerdo con INIA.

c) por consultoras privadas, organizaciones no gubernamentales o cualquier otro organismo con capacidad para ejecutar la investigación propuesta.

En todos los casos, la Junta Directiva del INIA decide la aplicación de recursos del FPTA para financiar proyectos, de acuerdo a su potencial contribución al desarrollo del sector agropecuario nacional y del acervo científico y tecnológico relativo a la investigación agropecuaria.

El INIA a través de su Junta Directiva y de sus técnicos especializados en las diferentes áreas de investigación, asesora y facilita la presentación de proyectos a los potenciales interesados. Las políticas y procedimientos para la presentación de proyectos son fijados periódicamente y hechos públicos a través de una amplia gama de medios de comunicación.

El FPTA es un instrumento para profundizar las vinculaciones tecnológicas con instituciones públicas y privadas, a los efectos de llevar a cabo proyectos conjuntos. De esta manera, se busca potenciar el uso de capacidades técnicas y de infraestructura instalada, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos nacionales para resolver problemas tecnológicos del sector agropecuario.

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria contribuye de esta manera a la consolidación de un sistema integrado de investigación agropecuaria para el Uruguay.

A través del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA), INIA ha financiado numerosos proyectos de investigación agropecuaria a distintas instituciones nacionales e internacionales. Muchos de estos proyectos han producido resultados que se integran a las recomendaciones tecnológicas que realiza la institución por sus medios habituales.

En esta serie de publicaciones, se han seleccionado los proyectos cuyos resultados se considera contribuyen al desarrollo del sector agropecuario nacional. Su relevancia, el potencial impacto de sus conclusiones y recomendaciones, y su aporte al conocimiento científico y tecnológico nacional e internacional, hacen necesaria la amplia difusión de estos resultados, objetivo al cual se pretende contribuir con esta publicación.



# CONTENIDO

	<b>Página</b>
1 INTRODUCCIÓN .....	11
2 ANTECEDENTES .....	11
3 OBJETIVOS .....	12
4 ÁREA DE ESTUDIO .....	13
4.1 Microcuencas Don Tomás y La Cantera .....	14
4.2 Microcuencas Santo Tomas.....	14
5 METODOLOGÍA.....	15
6 RESULTADOS .....	17
6.1 Balance Hídrico .....	17
6.2 Intercepción .....	19
6.3 Recarga de acuíferos .....	22
6.4 Calidad de aguas .....	25
6.5 Erosión de suelos.....	30
6.6 Consumo de agua en las diferentes coberturas .....	32
7 CONCLUSIONES .....	33
7.1 Balance hídrico .....	33
7.2 Intercepción .....	33
7.3 Recuperación de acuíferos .....	34
7.4 Calidad de aguas .....	34
7.5 Erosión de suelos.....	34
8 BIBLIOGRAFÍA .....	35





## **AGRADECIMIENTOS**

La línea de investigación vinculada a los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas y suelos, comenzó por iniciativa de la Dirección General Forestal, del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Posteriormente, se mantuvo con el apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República. Actualmente, los estudios que se presentan en esta publicación, han sido financiados por el Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Los autores agradecen a las autoridades y funcionarios de las instituciones mencionadas por su apoyo y colaboración durante estos diez años.

Nuestro agradecimiento también a los productores y empresas forestales que a lo largo de este tiempo han colaborado con la investigación cediendo sus predios para la instalación del instrumental e infraestructura necesarios y adaptando sus planes de cosecha y plantación de acuerdo a las necesidades de éste programa.

Finalmente agradecemos la participación y constante colaboración en esta línea de investigación de los colegas de la Universidad Austral de Chile.



Luis Silveira<sup>1</sup>; Christian Chreties<sup>1</sup>;  
Jimena Alonso<sup>1</sup>; Carlos Amorín<sup>1</sup>;  
Pedro De Izaguirre<sup>1</sup>; Magdalena  
Crisci<sup>1</sup>; Santiago Symonds<sup>1</sup>;  
Leticia Martínez<sup>2</sup>; Mario García<sup>2</sup>;  
Fernando García<sup>2</sup>; Silvana  
Delgado<sup>2</sup>; Carlos Clérico<sup>2</sup>; Lisette  
Bentancor<sup>2</sup>; Mariana Hill<sup>2</sup>;  
Florencia Alliaume<sup>2</sup>; Pablo  
Cabral<sup>3</sup>; Paola Audicio<sup>3</sup>; Andrés  
Iroumé<sup>4</sup>; Anton Huber<sup>4</sup>;  
Alejandro Schipilov<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería.

<sup>2</sup>Facultad de Agronomía.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias.

<sup>4</sup>Universidad Austral de Chile.

<sup>5</sup>Consultor.

# Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas

*Proyecto FPTA 210*

*Período de Ejecución: Mar. 2007-Jun. 2010*

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos veinte años, el Uruguay experimentó un significativo incremento de la superficie territorial afectada a la forestación industrial, en el marco de la política forestal amparada por la Ley N° 15.939. En este período, la superficie de bosques plantados con especies de rápido desarrollo, principalmente eucaliptos y pino, pasó de 45.000 hectáreas en 1990 a aproximadamente 1.000.000 de hectáreas en diciembre de 2009. Por otra parte, puesto que los suelos definidos como de prioridad forestal abarcan una extensión de 3,6 millones de hectáreas, y que la industria forestal se encuentra en pleno desarrollo, con la instalación de plantas para la producción de pasta de celulosa y aserraderos, se prevé que la superficie plantada continuará creciendo durante los próximos años.

Los procesos de deforestación y reforestación representan, a escala mundial, la modificación del uso de la tierra más significativa, tanto por la superficie afectada como por la incidencia sobre los procesos hidrológicos y edafológicos (Bosch, J.M. y Hewlett, J.D., 1982; Calder, 1992, 2005; Huber e Iroumé, 2001; Lima, 1992; Andréassian y Vazken, 2004; Lima y Sakia, 2006). Los grandes emprendimientos de empresas forestales, modificando el uso agrícola-ganadero tradicional del suelo en el Uruguay, han

creado preocupación en la sociedad, en las instituciones nacionales y en las propias empresas forestales respecto a su impacto sobre los recursos naturales, en particular cantidad y calidad de los recursos hídricos y erodabilidad de los suelos. Esto se debe a que, si bien las plantaciones forestales causan algunos efectos que pueden tener consecuencias positivas para el medio ambiente (por ej.: reducen la pérdida de suelo; estabilizan los cauces y regulan las crecidas), también pueden producir efectos nocivos para el medio ambiente (por ej.: el incremento de la biomasa aérea reduce la cantidad de agua que alcanza el suelo; su sistema radicular más profundo les permite acceder a una mayor cantidad de agua del suelo; la gestión inadecuada de las faenas forestales puede deteriorar el suelo; el uso de plaguicidas y/o herbicidas en la fase de establecimiento de una plantación forestal y/o reforestación puede contaminar tanto los cursos superficiales como los acuíferos a través de zonas de recarga explotadas forestalmente).

## 2 ANTECEDENTES

Con el propósito de estudiar los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas y suelos y tomando como patrón de comparación el campo natural para uso ganadero, es que desde fines del año 1998 a la fecha se

han ejecutado, a nivel nacional, los siguientes proyectos de investigación:

- «Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con *Eucalyptus* en el Uruguay». Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Ejecutado por las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República a través de un convenio entre la Universidad de la República (UDELAR) y la Unidad Ejecutora del Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego (PRENADER), con financiamiento del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Préstamo BIRF 3697-UR. La ejecución tuvo lugar entre el 4.12.1998 y 31.5.2001. Los resultados más relevantes se sintetizan en Silveira *et al.* (2006) y Delgado *et al.* (2006).
- «Proyecto INIA FPTA 102 Efectos del establecimiento de áreas forestadas en el comportamiento hidrológico de una cuenca en Tacuarembó, Uruguay.». Ejecutado por la empresa Colonvade S.A. y Weyerhaeuser Company Foundation (Chescheir *et al.*, 2008).
- «Impacto de las plantaciones forestales sobre los recursos hídricos. ¿Cómo extender la información de microcuencas experimentales a grandes cuencas?». Este proyecto, financiado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República, en el marco del programa de Investigación y Desarrollo, se ejecutó entre el 1.10.2002 y el 30.09.2004 por las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República, contando con el apoyo de DGF, DNH y UTE. Sus principales resultados se encuentran documentados en un par de publicaciones presentadas en el XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Silveira *et al.*, 2004; Silveira y Alonso, 2004).
- Proyecto de cooperación bilateral entre la Universidad de la República (Uruguay) y la Universidad Austral (Chile): «Impacto de las Plantaciones Forestales sobre los Recursos Hídricos». Financiación: Programa de

Desarrollo Tecnológico (PDT), Dirección Nacional de Ciencia y Tecnología (DINACYT). Ejecución: noviembre 2004-abril 2006.

- Proyecto CSIC I+D Llamado 2004: «Monitoreo y modelación hidrológica de la redistribución de la precipitación en plantaciones forestales». Ejecución: marzo 2005-febrero 2007. Los principales datos de redistribución de lluvias están documentados en De Izaguirre y Alonso (2006), Silveira y Alonso (2008).
- Proyecto PDT 3203: «Indicadores hidroambientales de manejo forestal sustentable de las plantaciones de *Eucalyptus* en el Uruguay». Financiación: Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), Dirección Nacional de Ciencia y Tecnología (DINACYT). Ejecución:septiembre 2005-agosto 2007. Los principales resultados del proyecto PDT 3203 están documentados en tres publicaciones presentadas en el XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Amorín y Silveira, 2008; Silveira *et al.*, 2008; Alonso y Silveira, 2008).

### 3 OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio consistió en evaluar los efectos de la actividad forestal sobre la cantidad y calidad del recurso agua y la pérdida de suelo, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo, medido como impacto relativo al campo natural para uso ganadero, que representa el uso tradicional del suelo en Uruguay.

En dicho marco, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Mantener y ampliar el programa de monitoreo ambiental iniciado en el marco del proyecto PDT 32/03, en el ámbito de las plantaciones de eucaliptos. Dicho programa comprendió dos microcuencas existentes: 1) microcuenca testigo bajo pastura para uso ganadero; 2) microcuenca forestal sin intervención durante todo el período de ejecución del proyecto; e incorporó dos nuevas microcuencas: 3) microcuenca cosechada en condiciones de suelo a capacidad de cam-

po o superior y seguidamente reforestada; 4) microcuenca cosechada en condiciones de suelos con déficit hídrico y seguidamente reforestada.

- Evaluar los efectos de plantaciones forestales sin intervención y los efectos que tiene la cosecha realizada en diferentes épocas del año (invierno y verano), y la posterior reforestación, sobre la pérdida de suelo y calidad y cantidad del recurso agua, medidos como impacto relativo a la situación natural bajo pastura para uso ganadero.
- Establecer indicadores hidrológicos y edáficos del manejo sustentable de plantaciones forestales.
- Sintetizar la información nacional producida por los proyectos ejecutados por el grupo postulante, desde 1998 a la fecha de finalización del presente proyecto.

#### 4 ÁREA DE ESTUDIO

Las zonas de estudio del proyecto corresponden a:

- Dos microcuencas ya existentes localizadas en los establecimientos Don Tomas (forestal) y La Cantera (pasturas naturales), sobre las cuales no fueron efectuadas intervenciones durante el período de ejecución del proyecto. La denominación de dichas microcuencas corresponderá, de aquí en más, al nombre del establecimiento en el que se localizan.
- Dos nuevas microcuencas forestales localizadas en el establecimiento Santo Tomás. La denominación de las mismas, corresponderá de aquí en más, al nombre del establecimiento seguido de los números 1 y 2 respectivamente.

Los establecimientos Don Tomás y La Cantera se ubican en el departamento de Paysandú, siendo su acceso por el km 48.5 de Ruta 90 que une las ciudades de Paysandú y Guichón (a la altura de Piedras Coloradas), mientras que el establecimiento Santo Tomás se localiza sobre la Ruta 25, en las proximidades de Algorta, departamento de Río Negro (Figura 1).

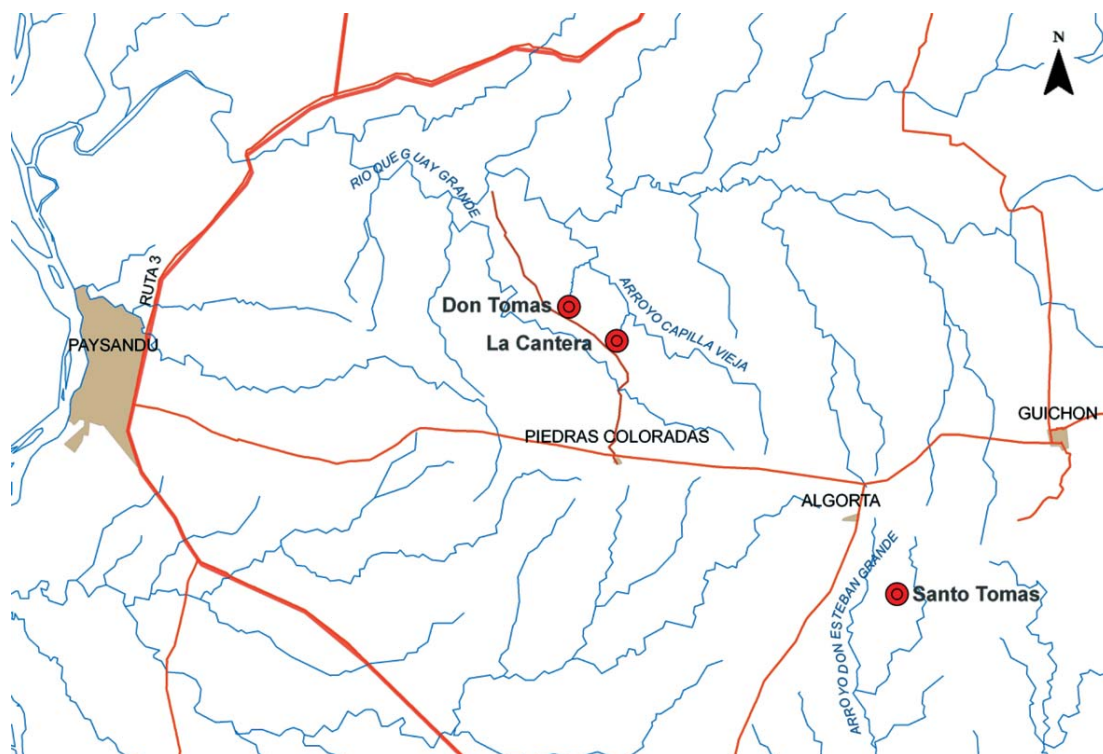


Figura 1. Localización de los establecimientos de las subcuencas de estudio

### 4.1 MICROCUENCAS DON TOMÁS Y LA CANTERA

La microcuenca Don Tomás está situada sobre la Cañada Baigorria mientras que la microcuenca La Cantera está situada sobre la cañada de la Quinta. Ambos cauces son afluentes del Arroyo Capilla Vieja en su margen izquierda (Figura 2).

Las principales características físicas de las microcuencas se presentan en el Cuadro 1.

La vegetación de la microcuenca La Cantera es de parque de algarrobos (*Prosopis* sp.) con gramíneas de ciclo invernal, mientras que en Don Tomas

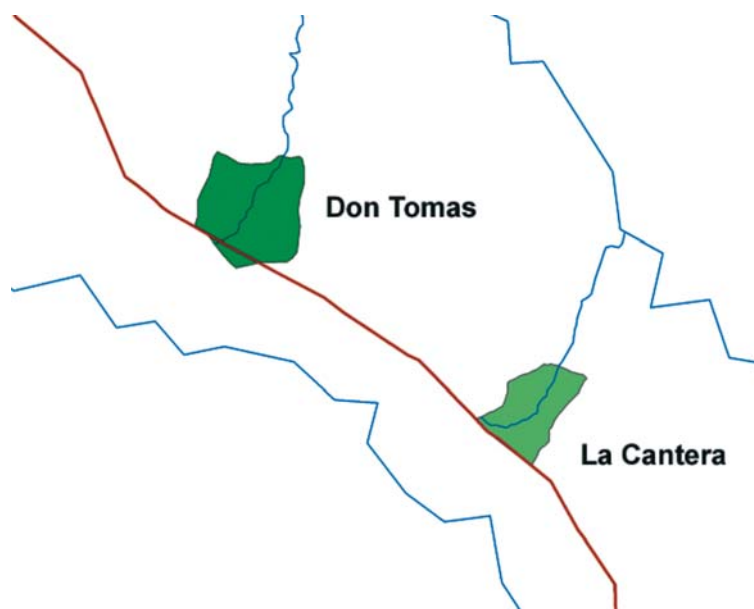


Figura 2. Localización de las subcuencas Don Tomás y La Cantera.

existe una plantación de *Eucalyptus* del tipo *globulus* sp. *maidenni* implantada en el otoño-primavera del año 1998, con una densidad de 895 árboles/ha.

Las características geomorfológicas y edáficas en ambas cuencas son muy semejantes, lo cual aporta validez a la metodología de estudio seleccionada, en la cual éstas serán utilizadas como elementos de comparación frente diferentes usos del suelo.

Los materiales generadores son sedimentos cretácicos con relieve escarpado y valles disectados, formando lomadas fuertes y suaves. Se visualizan varios niveles de escarpas, un nivel superior con alto contenido de material calcáreo que actúa como generador de los suelos de la superficie aplanada del interfluvio en la cabecera de ambas cuencas. Los suelos dominantes son vérticos, de profundidad variable, desarrollados sobre la escarpa calcárea. Por debajo de esta primera escarpa se encuentran suelos arenosos pardos de profundidad variable con gran diferenciación textural entre los horizontes superficiales y los subsuperficiales, que se clasifican como Brunosoles Subeutricos (dísticos) lúvicos. En las lomadas más suaves asociadas a las vías de drenaje se encuentran también suelos arenosos pero de color oscuro, más profundos y de menor diferenciación textural.

### 4.2 MICROCUENCAS SANTO TOMAS

En el Cuadro 2 se presentan las principales características hidrológicas de

Cuadro 1. Características físicas de las microcuencas Don Tomás y La Cantera.

Característica	Don Tomás	La Cantera
Área (km <sup>2</sup> )	2.12	1.20
Perímetro (km)	5.81	4.58
Long. Cauce (m)	1783	2168
Pend cauce principal (%)	0.90	1.58
Pend media cuenca (%)	4.68	5.92
Tc (min)	39.0	36.5

**Cuadro 2.** Características físicas de las microcuencas Santo Tomás.

Característica	Santo Tomás 1	Santo Tomás 2
Área (km <sup>2</sup> )	0.97	1.17
Perímetro (km)	4.0	4.6
Long. Cauce (m)	1232	1477
Pend cauce principal (%)	1.0	0.9
Pend media cuenca (%)	3.8	3.5
Tc (min)	25	31

las microcuencas ubicadas en el establecimiento Santo Tomás.

En las microcuencas del establecimiento Santo Tomás existieron plantaciones forestales cuya especie predominante era *Eucalyptus* del tipo *globulus*. Las mismas fueron cosechadas en diferentes condiciones de humedad de sus suelos, de acuerdo a los objetivos del estudio. Santo Tomás 1 fue cosechada en el verano 2009-2010, mientras que la cosecha de Santo Tomás 2 se realizó en la primavera del 2010.

El material geológico corresponde a areniscas con cemento arcilloso, frecuentemente de tonos rosados, a veces rojizos o blancos grisáceos. El relieve en general es suavemente ondulado con predominio de 1 a 3% de pendientes. Es una combinación de laderas extendidas de 1-2% de pendiente, predominando sobre laderas de disección de mayor convexidad y pendiente (3 a 5%), que corresponden a las litologías más gruesas del sedimento. Los suelos predominantes corresponden a Planosoles Dístricos Ocrícos, a veces Melánicos y Argisoles Dístricos Ocrícos Abrúpticos, a veces Típicos. El color de los horizontes superiores es pardo grisáceo oscuro, la textura es arenoso franca y son de fertilidad baja e imperfectamente drenados. En las laderas de mayor convexidad y pendiente, los Planosoles Dístricos Ocrícos presentan mayor espesor de horizonte A, de color pardo grisáceo, textura arenosa y fertilidad muy baja. Como asociados, en laderas medias y bajas de pendiente máxima de 1%, existen Brunosoles

Subéutricos, a veces Dístricos Típicos y Luvicos. Son de color pardo muy oscuro, textura franco arenosa, fertilidad media y drenaje moderadamente bueno a imperfecto.

## 5 METODOLOGÍA

La metodología consistió en:

- Comparar el comportamiento del ciclo hidrológico en una microcuenca forestal adulta (Don Tomás) y en una microcuenca de pasturas (La Canteira). Para cuantificar dicho comportamiento se analizaron, para ambas microcuencas, los siguientes indicadores: balance hídrico, interceptación de la precipitación incidente, recarga de acuíferos y calidad de aguas.
- Comparar la pérdida de suelos en dos subcuencas forestales cosechadas en diferentes condiciones de humedad de suelos (Santo Tomás 1 y Santo Tomás 2).

Para ello fue necesario monitorear las siguientes variables: precipitación (pluviógrafo), escorrentía (vertedero y limnógrafo), contenido de humedad del suelo (tubos para acceso de sonda de neutrones), nivel freático (piezómetros y limnógrafos) y calidad de aguas (tanto de lluvia como en cauce en donde se localizan los vertederos).

En las Figuras 3 y 5 se ubica en planta la instrumentación por microcuenca de estudio, y en las Figuras 4 y 6 se presentan algunas imágenes del instrumental e instalaciones existentes.

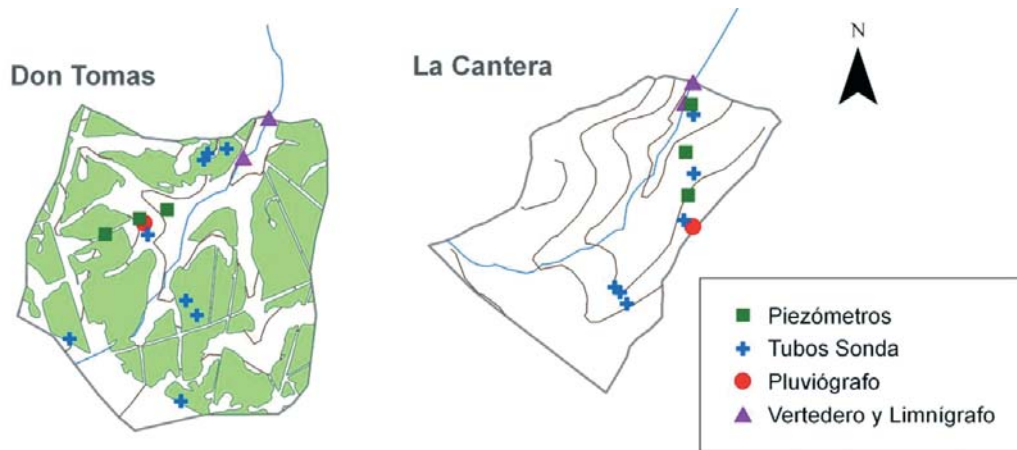


Figura 3. Localización de los instrumentos de medida en las microcuencas Don Tomás y La Cantera.



Estación meteorológica – Don Tomás.

Vertedero desde aguas arriba – La Cantera.

Figura 4. Fotografías de algunos equipos e instalaciones en las microcuencas Don Tomás y La Cantera.

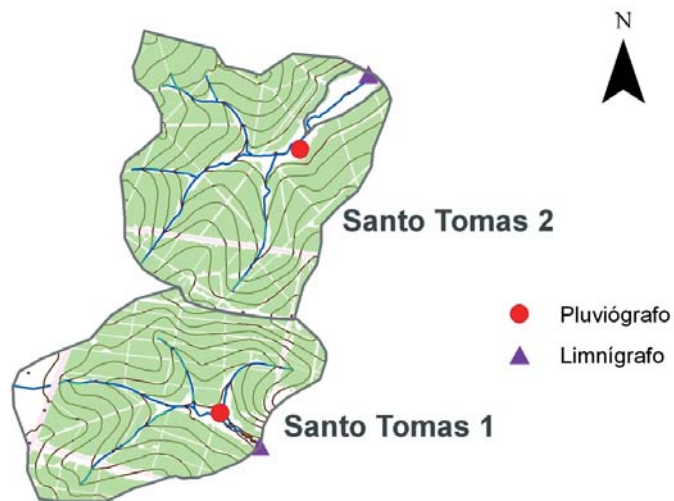


Figura 5. Localización de los instrumentos de medida en las microcuencas Santo Tomás.





Limnógrafo Santo Tomás 1 localizado en un tajamar existente al cierre de la cuenca.

Toma muestras de calidad de agua localizado en el cauce Santo Tomás 1.

Figura 6. Fotografías de algunos los equipos instalados en las microcuencas Santo Tomás.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico sintetiza la relación entre los principales componentes del ciclo hidrológico en una cuenca. Cualquiera sea la magnitud y dirección del cambio en las componentes del balance hídrico, la ley de conservación de la masa nos recuerda que su suma algebraica siempre debe ser igual a cero, en todo período de tiempo.

Para la realización del balance hídrico en las microcuencas Don Tomás (forestal) y La Cantera (pasturas naturales), se utilizó información mensual de: precipitación, humedad del suelo y escurrimiento registrada entre octubre-06 a setiembre-09.

El balance hídrico, estacional o anual, se ajusta a la siguiente ecuación:

$$P = Q + \Delta H + Perc + ETR$$

siendo:

P = precipitación incidente sobre la microcuenca.

Q = escurrimiento medido en el punto de cierre de la microcuenca.

$\Delta H$  = variación del contenido de agua en el suelo.

Perc = percolación.

ETR = evapotranspiración real en la microcuenca.

Las tres primeras variables en la ecuación (P, Q y  $\Delta H$ ) corresponden a datos monitoreados en las microcuencas Don Tomás y La Cantera. El término percolación es al menos un orden menor que los demás, con lo que puede desprejarse en la ecuación de balance hídrico. No obstante, hay que tener presente que indirectamente se lo incluye en el término de evapotranspiración real, puesto que el balance se ajusta calculando este término, que se lo compara con la evapotranspiración potencial media mensual.

En las Figuras 7, 8 y 9 se comparan las distintas componentes del balance hídrico estacional (Oct-Mar y Abr-Set), mientras que la Figura 10 muestra los balances anuales (Oct-Set), en ambas microcuencas.

Teniendo en cuenta que, el escurrimiento superficial es una medida integral de la relación precipitación – caudal en una cuenca, se puede definir un indicador adimensional que permita analizar la disminución de caudales en la microcuenca Don Tomás (forestal), tomando como patrón de comparación la microcuenca La Cantera (pasturas) y la lluvia caída en el período considerado (estación o año hidrológico):

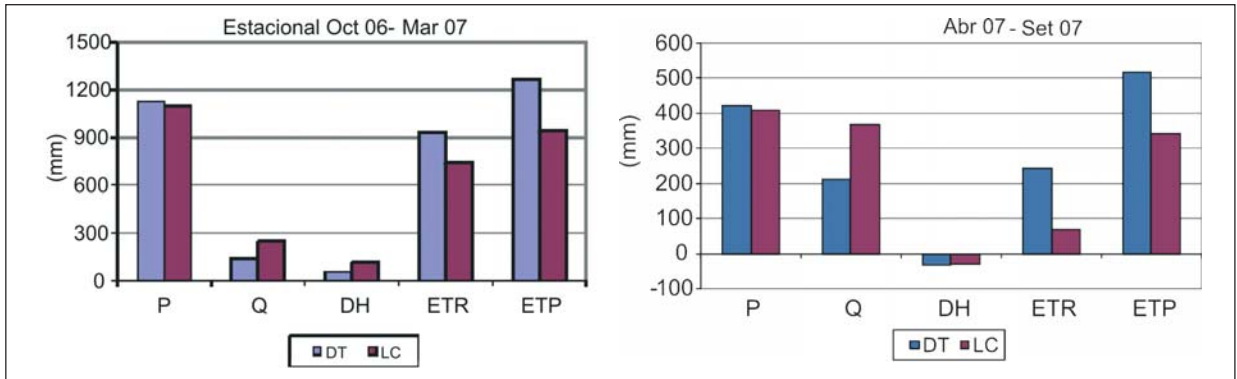


Figura 7. Balance hídrico estacional Oct 06 – Mar 07 y Abr 07 – Set 07.

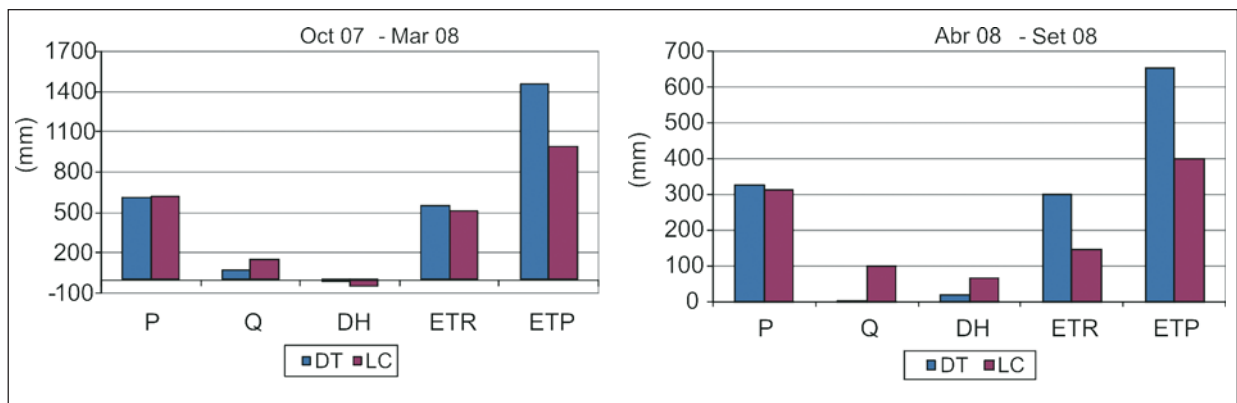


Figura 8. Balance hídrico estacional Oct 07 – Mar 08 y Abr 08 – Set 08.

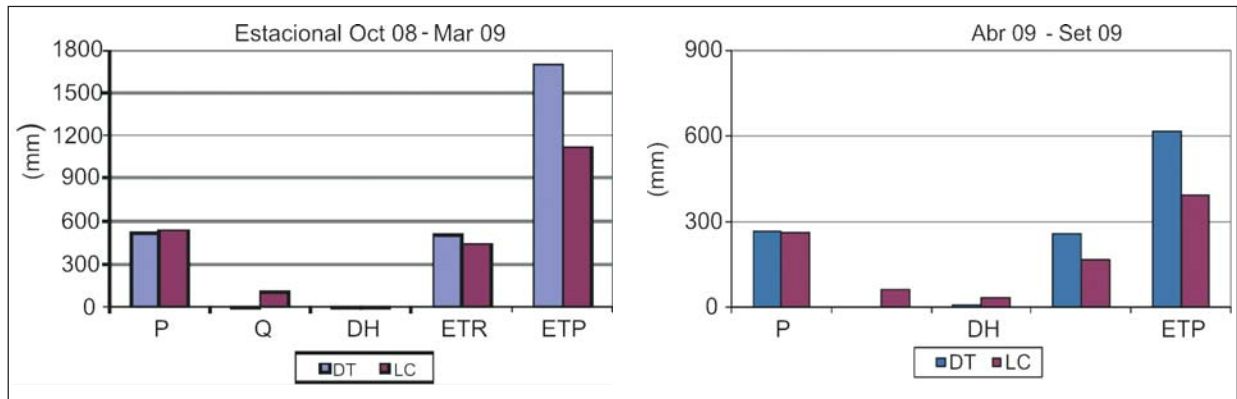


Figura 9. Balance hídrico estacional Oct 08 – Mar 09 y Abr 09 – Set 09.

siendo:

$Q_p$  = escurrimiento pasturas, semestral o anual, expresado en mm

$Q_f$  = escurrimiento forestal, semestral o anual, expresado en mm

$P_{acum}$  = precipitación acumulada en el semestre o en el año, expresada en mm

Este coeficiente adimensional, cuyos valores se presentan en el Cuadro 3, permite interpretar los balances hídricos presentados en las Figuras 7 a 10.

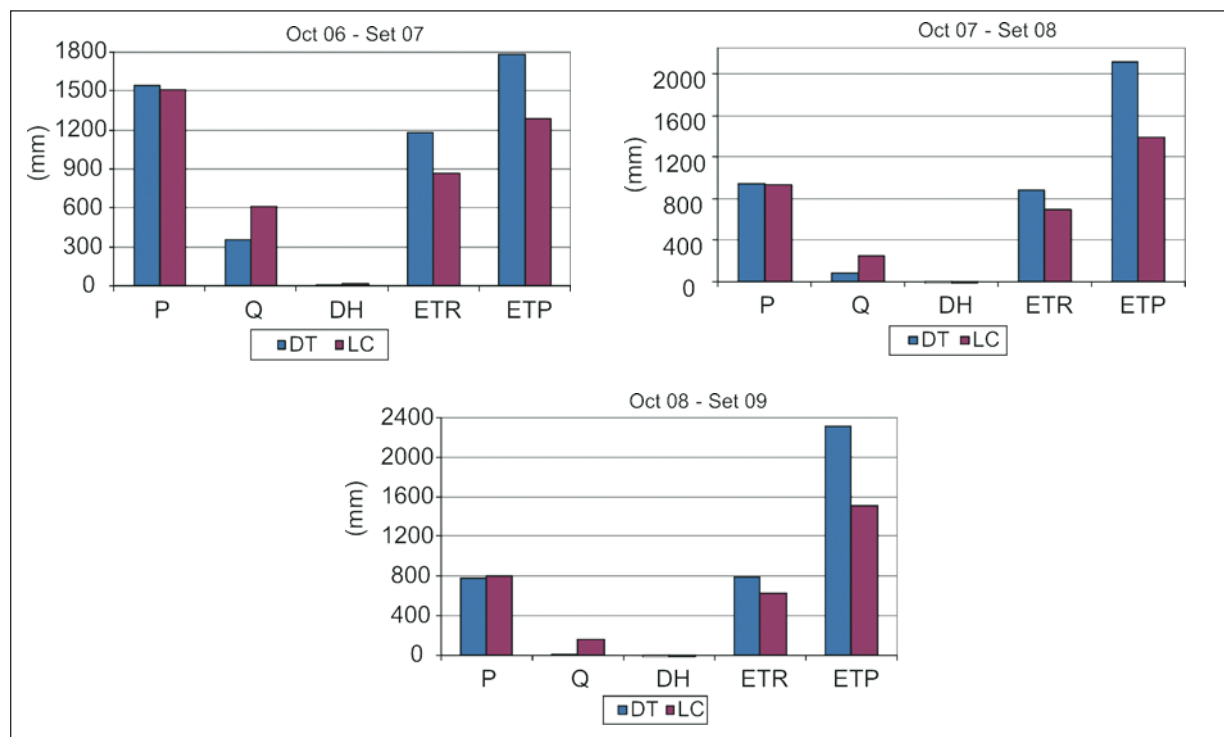


Figura 10. Balances hídricos anuales Oct 06 – Set 07, Oct 07 – Set 08 y Oct 08 – Set 09.

**Cuadro 3.** Indicador adimensional que relaciona la reducción en el escurrimiento con la precipitación acumulada en el período.

Período		P	$\frac{Q_p - Q_f}{P_{acum}}$
Estacional Primavera -Verano	Oct06-Mar07	1111	0.09
	Oct07-Mar08	614	0.13
	Oct08-Mar09	528	0.18
Estacional Otoño - Invierno	Abr07-Set07	415	0.38
	Abr08-Set08	320	0.30
	Abr09-Set09	266	0.24
Anual	Oct06-Set07	1526	0.17
	Oct07-Set08	934	0.19
	Oct08-Set09	795	0.20

## 6.2 INTERCEPCIÓN

Los ecosistemas forestales (bosques nativos o plantaciones industriales) juegan un papel trascendental en la redistribución de la precipitación total incidente, puesto que controlan la acción y el movimiento del agua. Una parte es retenida por las copas y troncos de los árboles (intercepción del dosel) y luego es reintegrada a la atmósfera por evaporación. La

fracción de la precipitación que llega al suelo está constituida por aquella que logra atravesar el dosel, conjuntamente con aquella que gotea desde las copas y la que escurre por los troncos. Esta reducción de la precipitación que efectivamente llega al suelo afecta, por lo tanto, los aportes fluviales aguas abajo. Por consiguiente, la medida de la intercepción (por eventos, estacional y anual) es un buen indicador de la reducción de

la precipitación que efectivamente llega al suelo, según las especies plantadas, edad, densidad de plantación y localización.

La fracción de la precipitación que llega al suelo está constituida por la precipitación directa que atraviesa el dosel (Pd), conjuntamente con precipitación o escurrimiento fustal (Pf). La intercepción (Ic) de la precipitación total incidente (P) por el dosel, se calcula como la diferencia entre la precipitación total incidente y la fracción de la precipitación que efectivamente llega al suelo:

$$I_c = P - (P_d + P_f)$$

La medición directa de P, Pd y Pf permite, por lo tanto, calcular Ic para la plantación bajo estudio, en este caso se instrumentó una parcela experimental en el establecimiento Don Tomás en Paysandú. Se presentan en primer lugar las relaciones observadas entre las variables monitoreadas. Posteriormente se presentan los resultados de la modelación efectuada implementando los modelos de Rutter *et al.* (1975) modificado por Abbot *et al.* (1986) y Gash (1979). Ambos modelos se calibraron y validaron para eventos diarios seleccionados en el período junio-06 a diciembre-09, obteniéndose buenos ajustes entre los datos simulados por los modelos y los datos

observados en la parcela de redistribución de la microcuenca Don Tomás.

### 6.2.1 INFORMACIÓN MONITOREADA

Entre el 1 de julio de 2006 y el 31 de diciembre de 2009 pudieron registrarse en forma completa 216 eventos que totalizan 2765 mm de precipitación total incidente. Se observa que la precipitación directa representa un 79% de la precipitación total incidente, mientras que la precipitación fustal representa un 4%. Para la intercepción, a pesar de la alta dispersión de los datos, se observa una relación de tipo logarítmica que indica la tendencia a una asíntota en la intercepción al aumentar la precipitación incidente. En valores promedio se tiene que la intercepción representa un 17% de la precipitación total incidente para la parcela experimental de Don Tomás.

Los resultados obtenidos en esta parcela de redistribución indican tendencias similares a las observadas en otros sitios de estudio instalados y monitoreados por los autores. En el Cuadro 4 se comparan los valores medios, máximos y mínimos obtenidos en diferentes ubicaciones, períodos de tiempos, tipo de plantaciones y edades. Asimismo, se presentan los valores medios de precipitación media mensual, precipitación directa (Pd) y escurrimiento fustal (Pf).

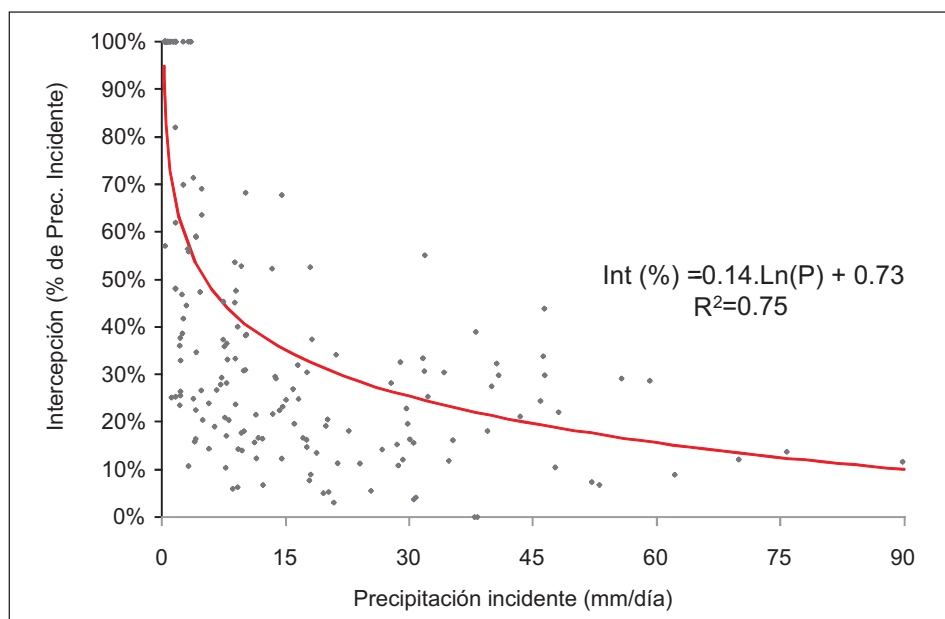


Figura 11. Relación entre la Intercepción y la precipitación total incidente para eventos diarios en la parcela Don Tomás.

**Cuadro 4.** Comparación de valores nacionales de intercepción.

PROYECTO	PRENADER	CSIC	PDT3203 / FPTA210	
Ubicación:	Tacuarembó	Lavalleja	Lavalleja	Paysandú
Establecimiento:	La Abuelita	Santa Julia	La Tacuara	Don Tomás
Plantación:	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus globulus</i> ssp. <i>Maidennii</i>
Densidad (árboles/ha):	1200	1330	1150	895
Edad (años) al inicio del período de medición:	7	8	9	8
Período de medición:	Ene – Oct 2000	Ene – May 2006	2008	Jul 06 – Mar 09
P media mensual (mm):	151	72	112	102
Observaciones:	Exceso hídrico	Déficit hídrico		
Pd (%):	87	77	78	79
Pf (%):	8	2	4	4
<b>Ic media (%):</b>	<b>5</b>	<b>21</b>	<b>18</b>	<b>17</b>

Dado que el proceso de intercepción responde a múltiples factores entre los que se encuentra la edad, densidad y características estructurales de la plantación, así como las características locales de las variables meteorológicas relacionadas a la evaporación, es posible inferir a partir de los resultados obtenidos, una relación creciente de la intercepción con la densidad de plantación. Por otro lado únicamente la parcela ubicada en Don Tomas cuenta con registros de variables meteorológicas por lo cual no es posible a nivel de las observaciones cuantificar el efecto de las variaciones debidas a la ubicación geográfica de los sitios de monitoreo. Finalmente cabe aclarar que en el primer trabajo realizado en el marco del proyecto PRENADER

(RETEIA, 2001) se determinó la intercepción utilizando una metodología de medición menos precisa que la desarrollada en los proyectos CSIC, PDT3203 y FPTA 210.

### 6.2.2 MODELACIÓN DE LA REDISTRIBUCIÓN

Los parámetros estructurales de la plantación se obtuvieron a partir de las relaciones a nivel de eventos, entre las variables de la redistribución y aplicando la metodología descrita por Leyton (1967) y por correlación directa. Además el índice de área foliar (IAF) fue estimado indirectamente mediante la metodología de fotografía hemisférica (Jonckheere *et al.*, 2004). Los parámetros se presentan en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Parámetros característicos del rodal de *Eucalyptus* en estudio.

Parámetro	Descripción	Valor
S	Almacenamiento máximo del dosel. [mm]	0,7 mm
p <sub>d</sub>	Coef. de atravesamiento libre. [adim]	0,263
S <sub>f</sub>	Almacenamiento máximo de los fustes. [mm]	
p <sub>f</sub>	Coef. de drenaje desde los fustes [adim]	
IAF	Índice de área foliar. [adim]	1,87 ± 0,27

Con las variables de entrada precipitación y evaporación además de los parámetros descritos se implementaron los modelos de redistribución de Rutter et al. (1975) y Gash (1979). En particular se presenta la implementación del modelo de Rutter modificado por Abbot *et al.* (1986) que fue aplicado con paso de tiempo horario en 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 Jul-06 a Dic-08, llegando a un ajuste cuyo coeficiente de Nash (Nash y Sutcliffe, 1970) es de 0,77 y el error cuadrático es de 39. La validación se realizó en el período Ene-Dic/09, obteniéndose un coeficiente de Nash de 0,73.

Se observa que el mejor ajuste del modelo corresponde al período Jul-06 a Dic-07, coincidiendo con el período de disponibilidad de datos en la estación meteorológica local para el cálculo de la evaporación. Esto demuestra la importancia de contar con datos meteorológicos cercanos al sitio para la modelación del fenómeno. 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.

### 6.3 RECARGA DE ACUÍFEROS

Entre los efectos nocivos para el medio ambiente, que se le atribuye a las plantaciones forestales, se señala que el incremento de la biomasa aérea reduce la cantidad de agua que alcanza el suelo y que su sistema radicular más profundo les permite acceder a una mayor cantidad de agua del suelo, afirmándose incluso que los *Eucalyptus* son verdaderas bombas de agua que secan los acuíferos. El tema es particularmente sensible en la zona litoral del país, donde se identifican pobladores que dependen de perforaciones someras para el consumo de agua potable, abrevadero de animales y/o riego.

Por consiguiente, la cuantificación de la recarga - expresada en mm o porcentaje de la lluvia estacional y/o anual - es un indicador robusto para medir los efectos de la forestación sobre los acuíferos y compararlo con la recarga que tiene lugar en pasturas para uso ganadero.

El cálculo de la recarga puede efectuarse aplicando diferentes metodologías, como la aplicación de balances hídricos, modelos numéricos como VISUAL BALAN, ensayos de campo tales como lisímetros y trazadores (Samper, 1998; Sophocleous, 2004). Sin embargo, su determinación aplica -en general- a acuíferos sedimentarios. En el caso particular de los acuíferos superficiales asociados a las microcuencas Don Tomás y

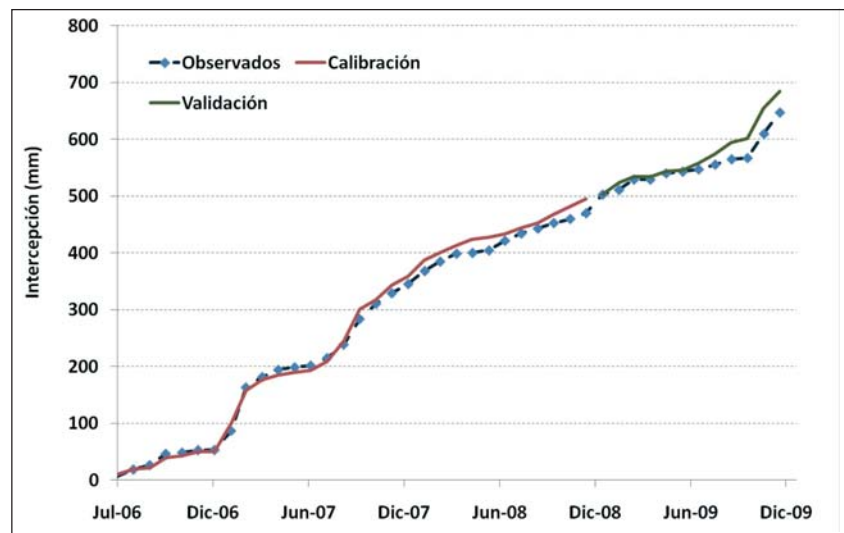


Figura 12. Ajuste del modelo de redistribución.

La Cantera, se trata de un medio compuesto (sedimentario-fracturado). Por ello, se optó por analizar la recuperación del nivel freático frente a eventos de lluvia y su posterior descenso.

El análisis de la recuperación de los acuíferos se basó en la información continua registrada en los piezómetros ubicados en: 1) la posición baja, próxima al cierre de las microcuencas Don Tomás y La Cantera, con una litología consistente en areniscas arcillosas y bancos gravillosos del tercio inferior de la Fm. Mercedes; 2) posición media, ubicada en el baricentro de las microcuencas, que evalúa la evolución de la napa freática en facies media de la Fm. Mercedes, correspondiente a conglomerados silicificados; y 3) posición alta, ubicados en la cabecera de las microcuencas, que monitorea la freática instalada en las litologías calcáreas del nivel superior de la Fm. Mercedes.

La Figura 13 muestra la respuesta de los niveles freáticos frente a eventos de lluvia y períodos secos, en el período comprendido entre julio de 2009 y abril de 2010. Ésta representa, en el eje izquierdo de las ordenadas, la profundidad de los niveles piezométricos (pastura-forestal), medida respecto a la superficie del terreno, y su variación en el tiempo. Asimismo, en el eje derecho de las ordenadas, se representa la diferencia entre la profundidad de los niveles piezométricos (pastura menos forestal). Cuando este gráfico es aproximadamente horizontal debe interpretarse como similar comportamiento en ambas coberturas, un descenso representa mayor recarga en la

microcuenca forestal y un ascenso mayor consumo o descenso en la microcuenca forestal.

El 18/11/2009 se registró un evento con 150 mm de precipitación, superior a la lluvia media histórica mensual en la zona. En la microcuenca forestal se tiene una respuesta (recuperación) de 1,57 m y 1,01 m en la microcuenca cubierta por pasturas naturales. La capacidad de infiltración y la porosidad eficaz del medio no explican este pronunciado ascenso, que puede deberse a su comportamiento combinado de medio permeable y medio por fracturación. En efecto, una porosidad eficaz de 20% requeriría una infiltración de 300 mm, respectivamente, 200 mm, para producir el ascenso observado.

En el período agosto-noviembre de 2009, dominado por escasas precipitaciones en relación a la media histórica, la diferencia de niveles se mantiene estable, próxima a 2 m. A partir del evento de noviembre de 2009, la diferencia se reduce a poco menos de 1 m, debido a la mayor recarga en la microcuenca forestal.

El verano de noviembre 2009 a marzo 2010 es particularmente lluvioso, con anomalías por encima de la media histórica, manteniéndose la diferencia de niveles en el entorno del metro. La lectura combinada de las tres curvas muestra que, en un período lluvioso, la recarga es mayor en la microcuenca forestal.

En abril de 2010 no se registran precipitaciones de importancia, y claramente se observa un mayor descenso de los niveles en la microcuenca forestal, con-

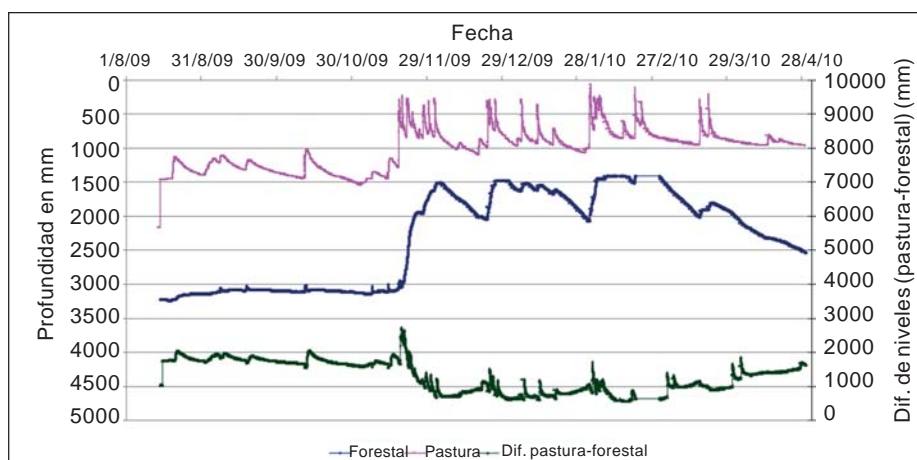


Figura 13. Recuperación de niveles piezométricos, ubicación baja.

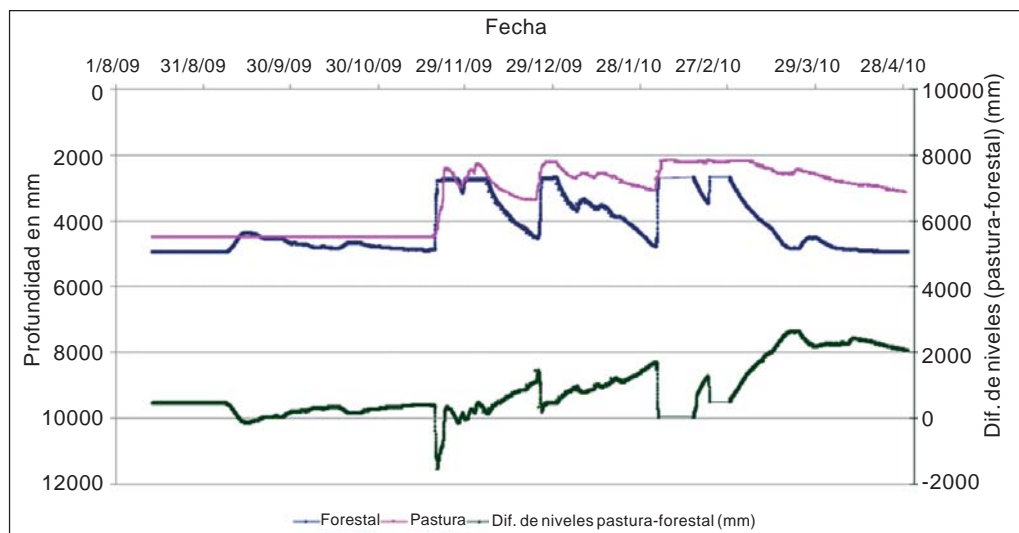


Figura 14. Recuperación de niveles piezométricos, ubicación media.

firmando que en situaciones de déficit hídrico, el consumo de agua de los árboles incide sobre los acuíferos someros.

La Figura 14 compara los piezómetros ubicados en la posición media de ambas microcuencas, que evalúa la facies media de la Fm. Mercedes, correspondiente a conglomerados silificados.

Para el mismo evento, del 18/11/2009, se tiene una recuperación (ascenso) similar en ambas coberturas, 2,12 m en la microcuenca forestal y 2,05 m en la microcuenca cubierta por pasturas naturales. Debe hacerse notar que el limnógrafo de que se dispone tiene un rango de medición que solo permite registrar variaciones del nivel freático de hasta dos metros, de ahí las trazas horizontales que se observan en la microcuenca forestal, que podrían corresponder a un mayor ascenso no registrado por estar fuera del rango de medición.

Para el evento de diciembre de 2009 se tiene una recuperación de niveles de 1,35 m en pasturas y 1,84 en la microcuenca forestal, y en febrero de 2010, 0,81 m y 2,05 m, respectivamente. Es decir, la recarga en la microcuenca forestal es mayor a la que se registra en pasturas naturales. En ambos casos, las trazas horizontales que se observan en la microcuenca forestal, podrían corresponder a un mayor ascenso no registrado por estar fuera del rango de medición. A continuación de los eventos de noviembre y diciembre de 2009 y febrero de 2010, es mucho más acentuado el des-

censo en la microcuenca forestal. La curva inferior, que ilustra la diferencia de niveles (pasturas-forestal) muestra que éstas son próximas a 0 (niveles similares) en el período de déficit hídrico (agosto-octubre de 2009) y en meses de primavera – verano muestra como se acentúa las diferencias a continuación de cada evento de lluvia, debido a los pronunciados descensos en la microcuenca forestal.

Por último, la Figura 15 presenta los niveles de los piezómetros ubicados en la cabecera de las microcuencas, que evalúan las litologías calcáreas del nivel superior de la Fm. Mercedes. Ambos piezómetros están situados a similar cota topográfica.

Se observa que el piezómetro ubicado en la microcuenca La Cantera (pasturas naturales) permanece seco entre agosto de 2009 y abril de 2010, y que el piezómetro ubicado en la microcuenca Don Tomás (forestal) también permanece seco entre agosto a noviembre de 2009. A partir del evento de noviembre de 2009, el piezómetro en la microcuenca forestal muestra una recuperación de niveles para cada evento de lluvia que se produce en la temporada de verano, entre noviembre de 2009 y febrero de 2010. En pasturas, el piezómetro permanece seco todo el tiempo. Esto parece confirmar que la cobertura forestal favorece la infiltración y, por lo tanto, la recarga. Asimismo, tratándose de temporada de verano, se observa que inmediatamente después que cesa la lluvia, se produce un rápido descenso de niveles.



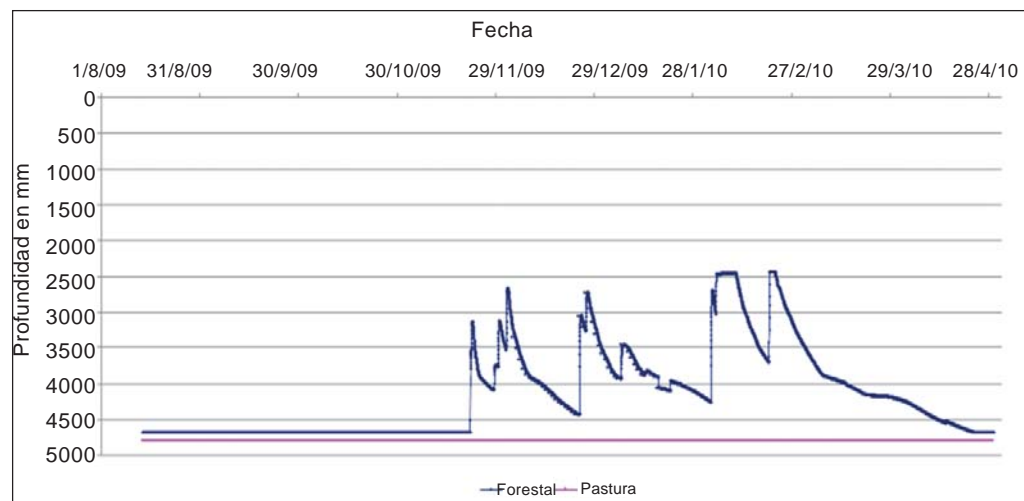


Figura 15. Recuperación de niveles piezométricos, ubicación alta.

## 6.4 CALIDAD DE AGUAS

La difusión, disolución y precipitación de contaminantes en la atmósfera depende de las condiciones meteorológicas y la composición física y química de los contaminantes. Las corrientes de aire transportan las sustancias contaminantes que escapan a la atmósfera, las difunde a través de procesos de difusión, se transforman a través de procesos físicos y químicos y se depositan sobre el terreno, la vegetación y el agua, ya sea directamente o a través de la precipitación. La deposición en pasturas naturales consiste principalmente en deposición húmeda, es decir, sustancias disueltas en las aguas de lluvias, mientras que en una plantación forestal las copas de los árboles filtran o retienen las partículas sólidas, gases y aerosoles del aire (deposición seca), y la lluvia produce un lavado puntual de los contaminantes. (Kindbom *et al.*, 1997). De las aguas que llegan al suelo, parte escurren superficialmente. En estas, las variaciones de largo plazo de la calidad son gobernadas predominantemente por cambios que ocurren en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, vinculados a sus diferentes usos y/o cobertura.

Puede, por lo tanto, afirmarse que la calidad del agua es, sin duda, un indicador adecuado de la calidad ambiental de las prácticas de manejo forestal adoptadas.

A continuación se presenta el análisis de las muestras tomadas entre junio de

2006 y noviembre de 2008. Si bien se trata de un período de 30 meses, el número de muestras es inferior a una por mes, 16 en la microcuenca con campo natural y 9 en la microcuenca forestal, debido a meses con déficit hídrico, en que no se registró caudal en los puntos de muestreo.

Si se comparan los resultados obtenidos en las aguas de las dos microcuencas, en primera instancia no se perciben diferencias importantes entre las mismas, encontrándose sus variaciones dentro de los rangos estadísticamente normales para agua naturales (McCutcheon *et al.*, 1993). Sin embargo una comparación de los valores realizada con la técnica de los «box-plot» muestra una tendencia de funcionamiento diferente entre las dos microcuencas, aunque no de gran significancia. Esto es, que en la mayoría de los parámetros analizados, tanto los valores de la mediana como de la media, correspondientes a la microcuenca forestal, son menores que los observados en la microcuenca con pasturas naturales. La única excepción es el  $K^+$  que presenta un andamio diferente.

### 6.4.1 ANÁLISIS DE IONES LOS MAYORITARIOS

Dentro de este conjunto se integran tanto los valores de los ocho iones mayoritarios ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ) así como sus parámetros asociados: pH, alcalinidad y dureza. Los datos de carbonatos, bicarbonato y dure-

za no fueron medidos en laboratorio sino que calculados en base a los otros parámetros.

En la Figura 16 puede observarse que el pH muestra que las aguas de ambas microcuencas son levemente alcalinas, con valores por encima de 7, registrándose en una única ocasión el valor 8 en la microcuenca La Cantera (pasturas naturales). El valor más bajo se registró en la microcuenca forestal, coincidiendo con el valor más bajo obtenido en la microcuenca La Cantera. Que los valores de pH se encuentren tan próximos a la neutralidad y con tendencias alcalinas, no es extraño dado los altos valores de alcalinidad medidos, lo que estaría indicando que los sistemas se encuentran adecuadamente «tamponeados» por el sistema de los carbonatos. Los valores de alcalinidad si bien son valores normales para este tipo de agua, se encuentran

dentro del rango superior de las aguas en el Uruguay.

Mientras que la microcuenca La Cantera presenta un rango de variación de alcalinidad muy estrecho, que van entre 230 y 303 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , en la microcuenca forestal se midieron dos valores por debajo de los 200 mg/l, que corresponden al mismo mes.

Los valores de dureza calculados son muy altos para este tipo de agua, pudiéndose clasificar las mismas como aguas muy duras. La dureza se explica por los altos valores encontrados en  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Seguramente estos iones controlan los valores de alcalinidad, ya que las aguas de ambas microcuencas presentan una tendencia a la precipitación del carbonato de calcio. La microcuenca forestal presenta valores más bajos que la con pasturas.

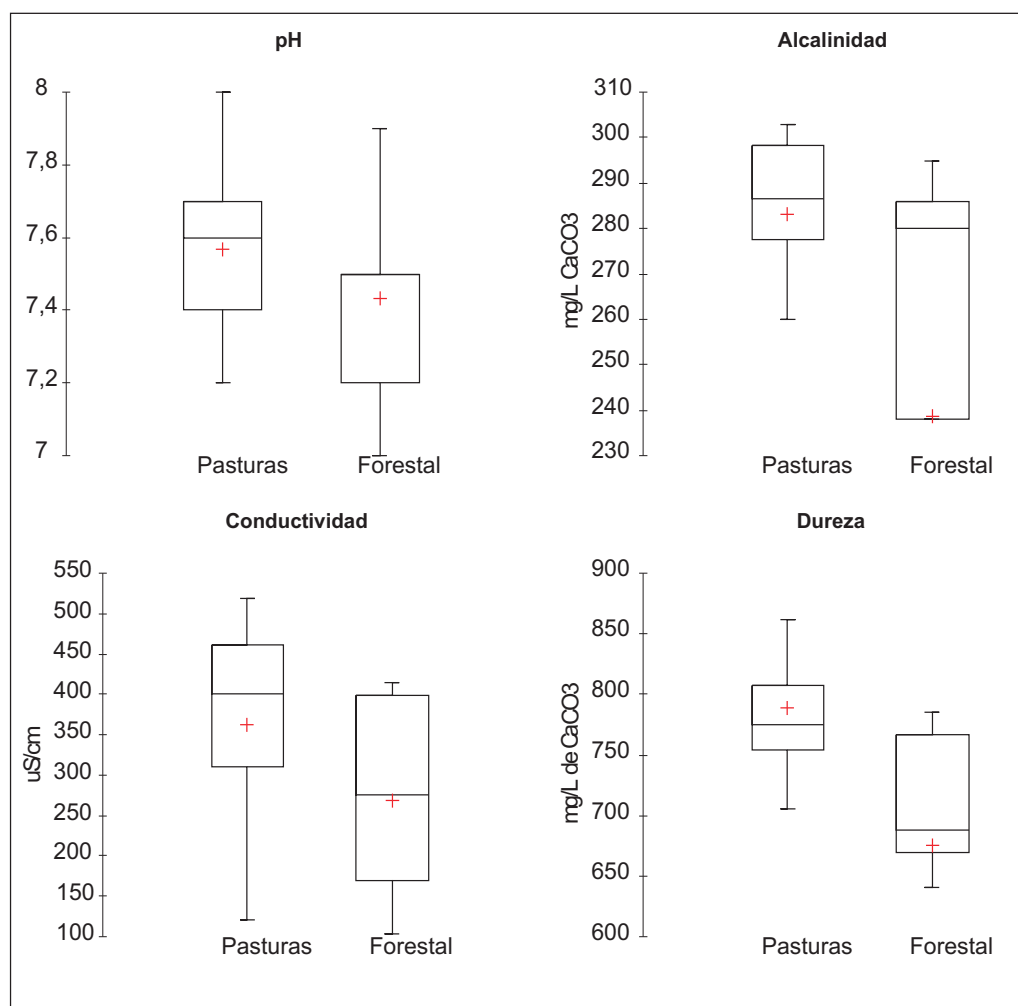


Figura 16. Comparación de valores de pH, alcalinidad, conductividad y dureza.

También la conductividad presenta diferencias entre las dos microcuencas, presentando menores valores en la microcuenca forestal. Si bien todos los iones mayoritarios tienen influencia en este parámetro, los que presentan mayor presencia son el  $\text{Ca}^{2+}$  y los bicarbonatos, que estarían explicando los valores medidos en este parámetro.

Se observa, analizado el comportamiento de los cuatro cationes mayoritarios (calcio, magnesio, sodio y potasio), en los tres primeros la misma tendencia que en los anteriores parámetros, es decir, mostrando menores valores en la microcuenca forestal. La excepción a esto, es el potasio, cuyo comportamiento es el inverso, es decir, mostrando mayores valores en la microcuenca forestal (Figura 17). En ambas microcuencas, la presencia de los cationes bivalen-

tes es mucho más alta que los monovalentes. La relación entre ambos muestra que la diferencia es mayor en la microcuenca forestal, es decir, es en ella que los cationes bivalentes presentan una mayor presencia que los monovalentes, a pesar del aumento del potasio.

En los aniones, los únicos datos a analizar corresponden a los bicarbonatos y carbonatos (Figura 18), que fueron calculados a partir de la alcalinidad y el pH. Los valores de cloruros y sulfatos se encuentran muy próximos al límite de cuantificación con la técnica utilizada y, por tanto, no es posible un análisis estadístico de estos valores. Aún así, puede observarse que tanto en los analizados, como en los no analizados, la tendencia es la misma, presentando menores valores la microcuenca forestal.

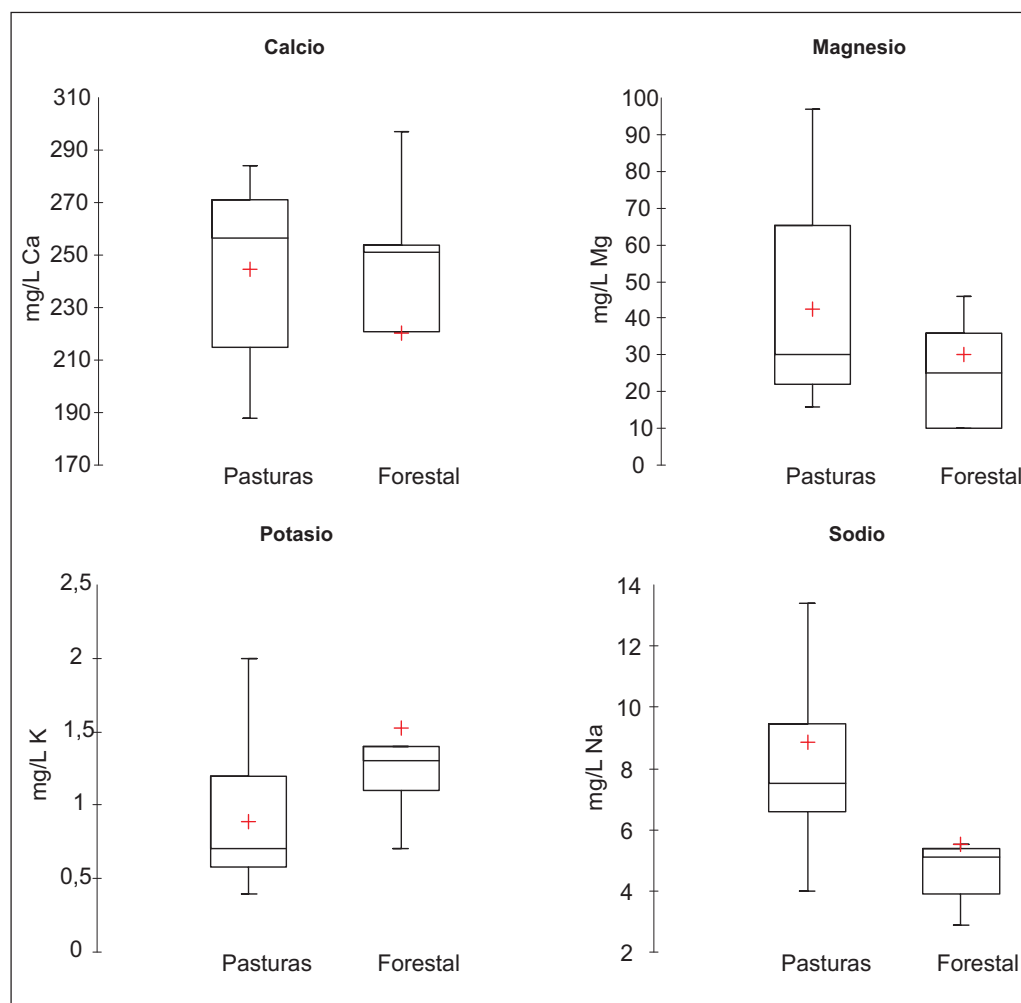


Figura 17. Comparación de valores de calcio, magnesio, potasio y sodio.

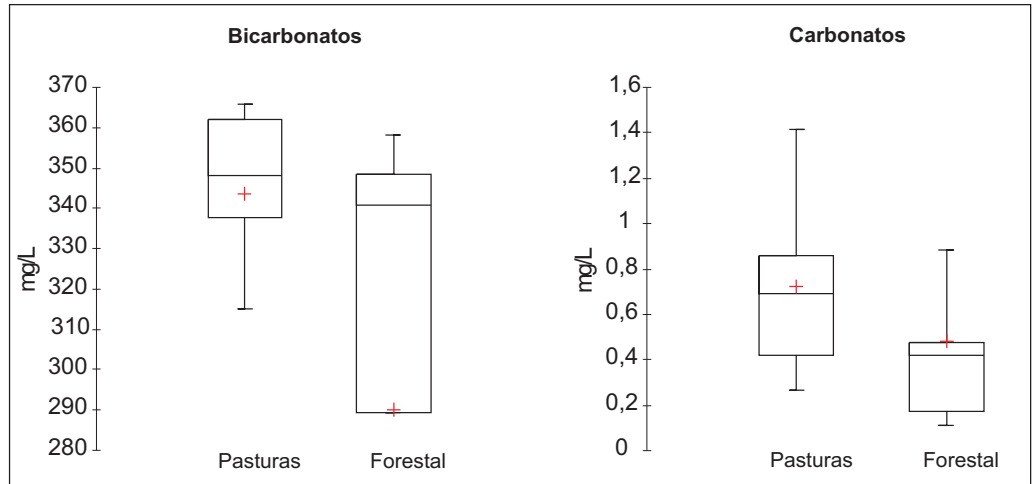


Figura 18. Comparación de valores de bicarbonatos y carbonatos.

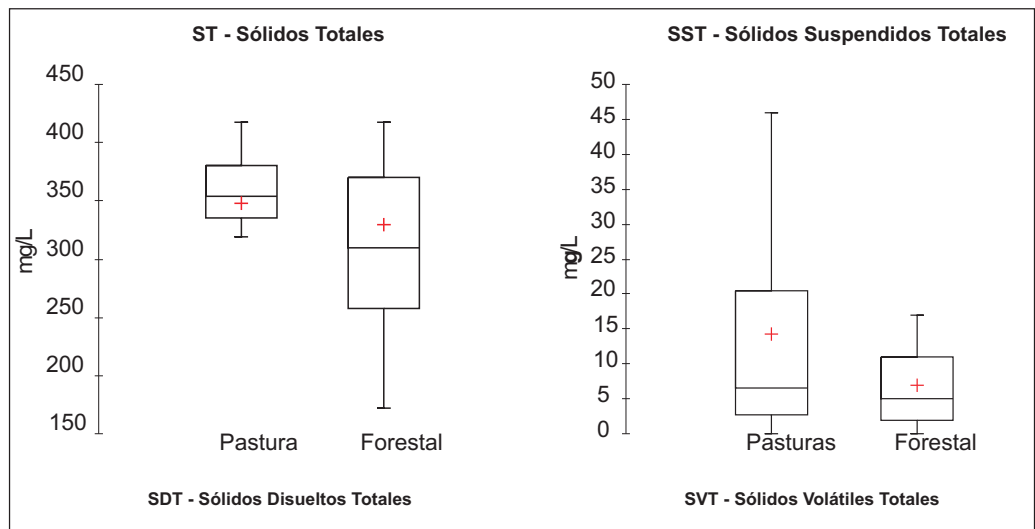
**6.4.2 ANÁLISIS DE NUTRIENTES**

Los valores de nutrientes medidos (ortofosfatos y nitratos), presentaron valores muy próximos al límite de cuantificación, lo que dificulta su análisis gráfico. No obstante, estos también presentan la misma tendencia, encontrándose en general menores valores en la microcuenca forestal.

**6.4.3 ANÁLISIS DE SÓLIDOS**

Los sólidos son parámetros globales que permiten generar una idea de cuales son las principales características de las aguas analizadas. Como se señalara precedentemente, parte de estos parámetros son medidos y parte son calculados. Si bien también presentan menores valores para la microcuenca forestal, esta tendencia no es tan evidente en todos los

sólidos, existiendo algunos donde la mediana de la microcuenca forestal es mayor a la de pasturas y en otra lo es la media. Los sólidos totales en ambas microcuencas presentan valores entre los más altos para microcuencas naturales, aunque dentro de los normales. En los dos casos, la mayoría de estos sólidos se encuentran disueltos, estando divididos entre los disueltos fijos y los disueltos volátiles, con alguna variación muy leve entre microcuencas. Mientras que en la microcuenca con pasturas el 50 % de los SDT son Volátiles y el otro 50 % Fijos, en la microcuenca forestal existe una muy leve tendencia hacia los sólidos volátiles, es decir, una mayor presencia de materia orgánica disuelta frente a las sales disueltas, aunque de ninguna manera significativa, (Figura 19).



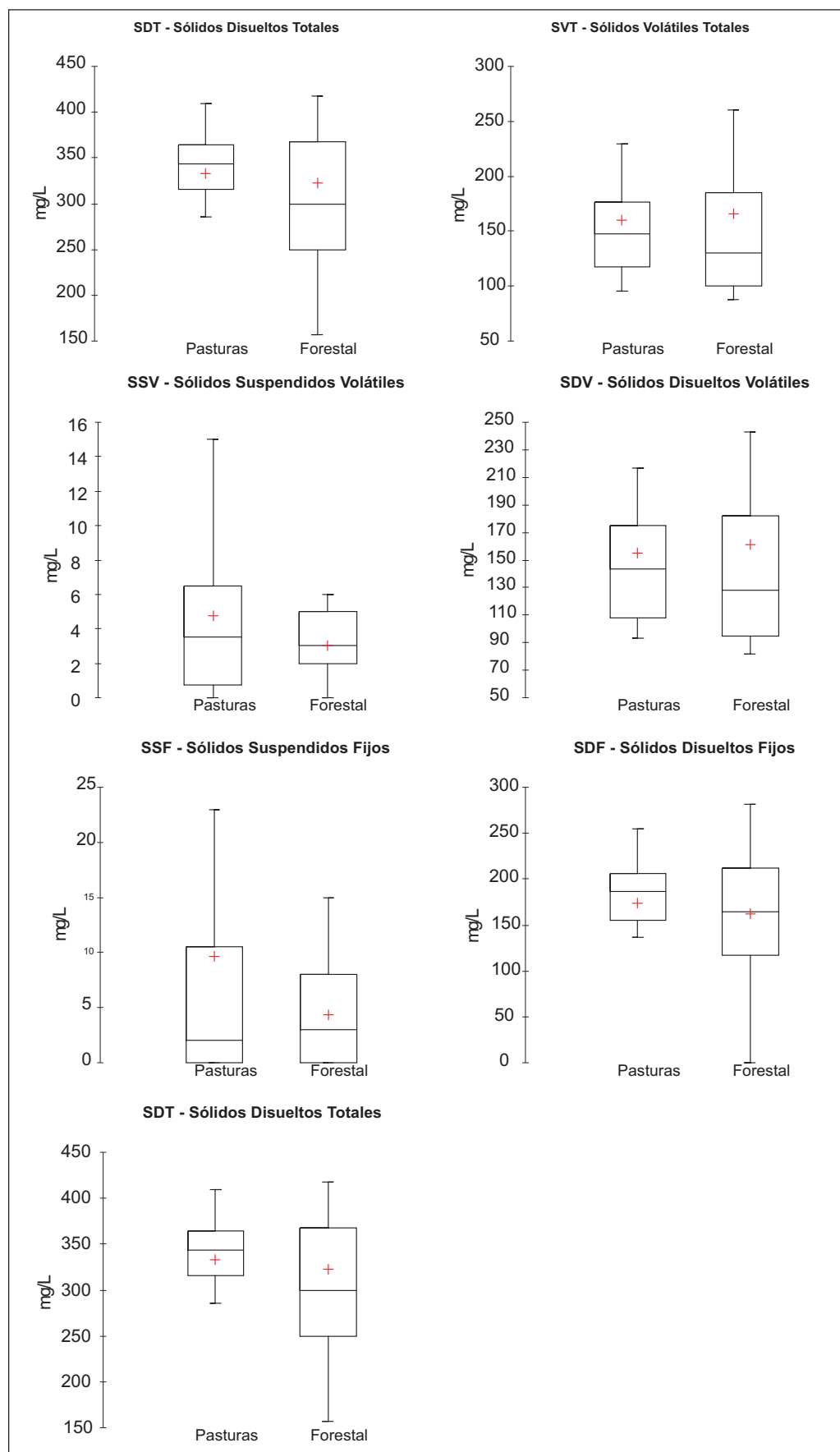


Figura 19. Comparación de los sólidos medidos y calculados

## 6.5 EROSIÓN DE SUELOS

### 6.5.1 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE EROSIÓN

El modelo USLE/RUSLE fue aplicado para estimar el potencial de erosión tanto en las microcuencas testigo (pastura y forestada) como en las microcuencas sometidas a cosecha, los resultados se presentan en los Cuadros 6 y 7. Los factores del modelo se tomaron de la base de datos del programa Erosión 5.0 (Hill *et al.*, 2008). Se evaluaron los suelos dominantes en cada microcuenca y se consideraron tres situaciones topográficas: pendiente (S) nula para la zona alta y plana, 3% para la zona de ladera media y 0.5% en ladera baja, y se tomo una longitud de la pendiente (L) de 100 m en cada caso con el objetivo de hacer comparable los resultados. En ninguna de las situaciones se supera el monto de pérdida de suelo tolerable para el suelo considerado, el cual es en ambos casos de 7 Mg/ha.año.

Como se observa los valores de erosión estimados para las diferentes situaciones de la microcuencas testigo son muy similares a los obtenidos para las microcuencas que fueron sometidas a prácticas de cosecha.

### 6.5.2 ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN CON CS<sup>137</sup>

El Cs<sup>137</sup>, es un radionucleido artificial con una vida media de 30,12 años, producido por fisión nuclear. Tiene una distribución global producida por las explosiones nucleares de los años 50 y 60. El valor como trazador del Cs<sup>137</sup> se debe a su rápida y fuerte adsorción por las partículas finas de suelo, particularmente minerales arcillosos y materiales húmicos (Tamura,1964; Bachhuber *et al.*,1982). En los agro-ecosistemas la redistribución de Cs<sup>137</sup> se considera como un directo resultado de la erosión, transporte y deposición de las partículas de suelo en el período que va desde la deposición atmosférica hasta la fecha de muestreo (Walling y Quine,1995). En pasturas naturales con suelos imperturbados el Cs<sup>137</sup> se concentra cerca de la superficie del suelo, involucrando una gran proporción del inventario de Cs original, mientras en el caso de suelos perturbados o laboreados, el Cs se distribuye a través de la capa laboreada e involucra una pequeña proporción del inventario original (Walling y Quine, 1990,1993).

También, es posible estimar la diferencia de erosión entre usos de la tierra en un determinado período desde que se

**Cuadro 6.** Estimación de la pérdida de suelo para diferentes situaciones en las microcuencas testigos La Cantera (pastura natural) y Don Tomas (forestada) mediante la aplicación del modelo EROSION 5.

Tipo de suelo	Topografía	Situación <sup>1</sup>	Parámetros del modelo Erosión 5.0						Erosión estimada Mg/ha
			R	K	S	L	C Rusle	P	
Brunosol Unidad Baygorria	Ladera alta	CN					0.02		0.1
		MI	659	0.21	0	100	0.006	1	0
		MC					0.03		0.1
	Ladera media	CN					0.002		1.6
		MI	659	0.21	3	100	0.006	1	0.5
		MC					0.03		2.4
	Ladera baja	CN					0.002		0.3
		MI	659	0.21	0.5	100	0.006	1	0.1
		MC					0.03		0.4

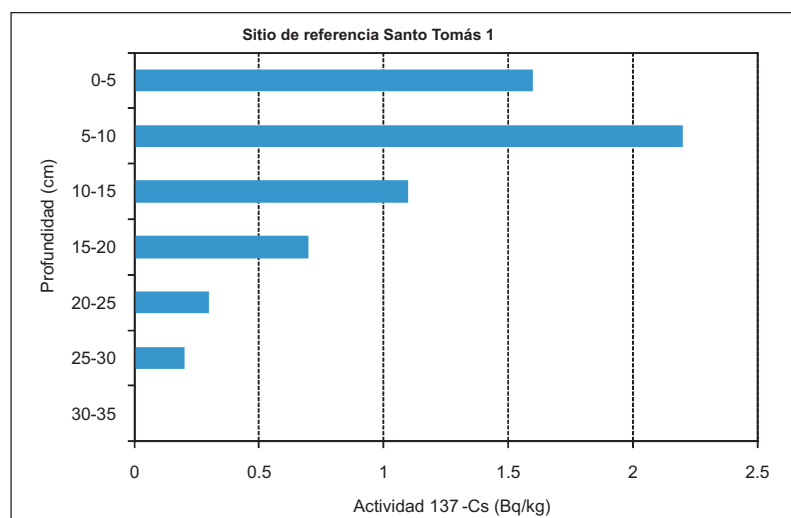
<sup>1</sup> CN: campo natural, MI: monte implantado, MC: monte recién cosechado con restos en superficie.

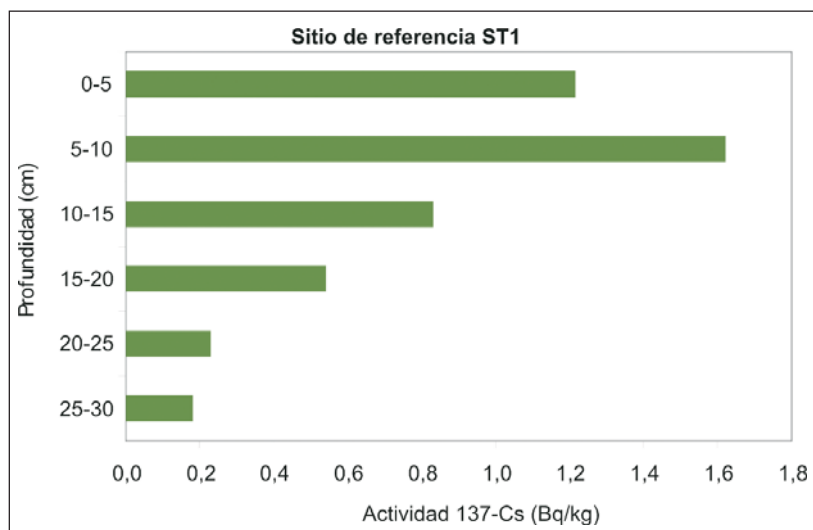
**Cuadro 7.** Estimación de la pérdida de suelo para diferentes situaciones en las microcuencas sometidas a prácticas de cosecha, establecimiento Santo Tomás, modelo EROSION 5.

Tipo de suelo	Topografía	Situación <sup>1</sup>	Parámetros del modelo Erosión 5.0					Erosión estimada Mg/ha	
			R	K	S	L	C Rusle		P
Argisol Unidad Algorta	Ladera alta	CN					0.02		0.1
		MI	659	0.20	0	100	0.006	1	0
		MC					0.03		0.1
	Ladera media	CN					0.002		1.5
		MI	659	0.20	3	100	0.006	1	0.4
		MC					0.03		2.2
	Ladera baja	CN					0.002		0.3
		MI	659	0.20	0.5	100	0.006	1	0.1
		MC					0.03		0.4

conoce que ha ocurrido un cambio, como en el caso de la forestación sobre pasturas naturales o regeneradas. Si como es conocido, la pérdida de suelo por erosión bajo pasturas es muy baja y se puede considerar que estima a la tasa de erosión natural o geológica, la diferencia en el stock de Cs entre el suelo forestado y el que se encuentra en los cortafuegos bien empastados y sin perturbación, se puede considerar que es una medida de la erosión ocurrida en el período desde la plantación hasta el presente. Los resultados de Cs<sup>137</sup> obtenidos a partir de las muestras de referencia en la microcuenca ST1, muestran que es posible medir niveles de concentración hasta una pro-

fundidad de 25 cm, siendo a mayor profundidad su concentración menor al límite de detección del equipo (0.3 Bq/kg). Este resultado concuerda con lo esperado, ya que generalmente se observa que la profundidad de penetración del Cs<sup>137</sup> no supera los 30 cm. Por otro lado la mayor concentración de Cs<sup>137</sup> se encontró entre los 5-10 cm (2.2 Bq/kg) observándose un decrecimiento exponencial en función de la profundidad. Es así que el perfil de concentración de Cs<sup>137</sup> obtenido concuerda con un sitio referencia, que puede ser utilizado para estimar erosión en otras zonas que presenten suelo con las mismas características (Zapata, 2003) (Figura 20).

**Figura 20.** Perfil de Cs<sup>137</sup> para el sitio de referencia de la microcuenca ST1.



**Figura 21.** Perfil de Cs<sup>137</sup> para la muestra de media ladera en situación pre-cosecha de la microcuenca ST1.

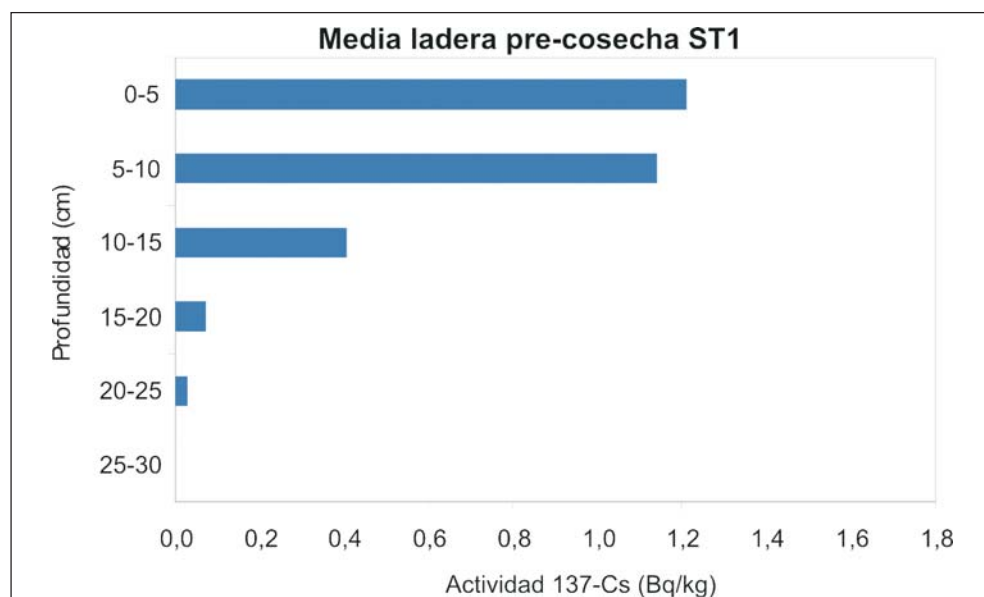
Por otro lado se presenta el perfil de concentración de Cs<sup>137</sup> obtenido en una muestra de media ladera de la microcuenca ST1 tomada en enero del 2010 y representativa de la situación pre-cosecha (Figura 21).

Comparando ambos perfiles se observa una clara disminución en el valor máximo de concentración de Cs<sup>137</sup> en las muestras de media ladera, donde era esperable observar erosión, con respecto al sitio elegido como referencia. Por otro lado la profundidad máxima a la que se encuentra el Cs<sup>137</sup> en el suelo correspondiente a media ladera, nos indicaría la posible pérdida de suelo debido a

erosión. Es necesario aún el análisis más exhaustivo de estos datos para poder confirmarlo y estimar las tasas de erosión correspondientes.

### 6.6 CONSUMO DE AGUA EN LAS DIFERENTES COBERTURAS

El consumo de agua se determinó a partir del balance hídrico realizado en el período de tiempo comprendido entre dos medidas de agua en el suelo sucesivas (aproximadamente mensual). Los resultados se muestran acumulados en forma trimestral (Figura 22).



**Figura 22.** Consumo de agua en las distintas coberturas.



Al comparar los resultados de la ETr estimada para ambas microcuencas se observa que no existen grandes diferencias en cuanto al consumo de agua por la vegetación, los mayores valores estimados en la microcuenca forestada estarían dados porque está incluida, dentro del consumo total de agua, la fracción de la precipitación que es interceptada y reintegrada a la atmósfera por evaporación. Los valores de intercepción medidos en un gran número de eventos durante los tres años de estudio están comprendidos entre el 23 y 27% de la precipitación anual, por lo cual reafirma lo mencionado anteriormente de que las diferencias en el consumo de agua entre coberturas estarían dadas por la mayor intercepción ocasionado por el follaje forestal.

Puede observarse que a nivel anual la ETr forestal estuvo comprendida entre un 82 y 100%. Las diferencias entre años estarían dadas por el monto de las precipitaciones correspondientes, cuanto menor es la entrada de agua al sistema (precipitación anual) mayor es el porcentaje de la misma que es consumida por la vegetación. Para la misma situación la ETr correspondiente a cobertura de pastos fue entre el 76 y el 88% de la precipitación total.

## 7 CONCLUSIONES

### 7.1 BALANCE HÍDRICO

El programa de investigación y monitoreo permitió establecer los primeros balances hídricos en el Uruguay, comparando microcuencas con cobertura forestal y pastura natural para uso ganadero.

Estos primeros resultados corresponden, en su totalidad, a años en que se registraron anomalías de precipitación. Particularmente, en los meses de primavera-verano, la lluvia registrada, en promedio, duplicó a la de meses de otoño-invierno. Es decir, que estacionalmente se registraron excesos de precipitación en primavera-verano y déficit hídrico en otoño-invierno, en comparación con los registros históricos. En términos anuales, se observa un decrecimiento del escurrimiento en la microcuenca forestal del orden del 17 a 20% de la lluvia caída.

Esta diferencia se expresa en un incremento de igual orden de la evapotranspiración real, que indirectamente también incluye el término de recarga (Perc), puesto que no se dispone de registros continuos de la evolución de la napa freática. Estacionalmente, el decrecimiento del escurrimiento en la microcuenca forestal es muy variable, con rangos entre 10 a 18% de la lluvia caída en meses de primavera-verano y 24 a 38% de la lluvia caída en meses de otoño-invierno, caracterizados por déficit hídrico.

La satisfacción de la evapotranspiración potencial es mayor, en meses de primavera-verano, en suelos cubiertos por pasturas. Esta relación se invierte en meses de otoño-invierno, donde la satisfacción de la evapotranspiración potencial es mayor en suelos bajo plantación forestal. Si se tiene en cuenta que las precipitaciones fueron anómalas (exceso en meses de primavera-verano y déficit en meses de otoño-invierno), esto puede asociarse a una mayor capacidad de los árboles a extraer agua del suelo en situaciones de déficit hídrico. Una limitación de éste estudio refiere a la estimación realizada de la resistencia estomática, a partir de la cual se podría estar sobreestimando el valor de ETP en la forestación y con ello una menor satisfacción de ésta.

### 7.2 INTERCEPCIÓN

La instalación de parcelas experimentales para el monitoreo de las componentes de la redistribución de la precipitación, permitió cuantificar la intercepción en términos de porcentaje de la precipitación total incidente. Se observó que en una plantación adulta de *Eucalyptus* del tipo *globulus sp. maidenni*, con una densidad de 895 árboles/ha la intercepción decrece con el aumento de la precipitación tendiendo a una asíntota algo superior al 10% en términos diarios, mientras que en términos medios dicha intercepción de cuantificó como un 17% de la precipitación total incidente. Observando estos resultados en conjunto con los obtenidos en la comparación del balance hídrico realizada en las microcuencas de distinta cobertura, es posible asignar a la

intercepción del dosel forestal gran parte del incremento verificado en la evapotranspiración potencial.

Con la incorporación del índice de área foliar y utilizando además como variables de entrada la precipitación y evaporación se ajustó un modelo de redistribución de la precipitación, basado en el modelo planteado por Rutter *et al.* (1975) y modificado por Abbot *et al.* (1986), obteniéndose un muy buen ajuste. Se verifica la sensibilidad del modelo a la variable de entrada evaporación, confirmando la importancia de contar con información meteorológica en sitio. También se evidencia la necesidad de ampliar la serie de datos incorporando eventos de altas intensidades de precipitación como los registrados en el último período (validación) que no pudieron ser bien simulados en el modelo.

### 7.3 RECUPERACIÓN DE ACUÍFEROS

El monitoreo continuo de niveles freáticos permitió observar una rápida respuesta frente a eventos de lluvia en ambos tipos de cobertura (forestal-pasturas), excepto en la cabecera de la microcuenca cubierta por pasturas, que permanece seco durante todo el período de monitoreo. En el período de verano, noviembre 2009-febrero 2010, caracterizado por exceso de precipitaciones, por encima de la media histórica, se observa que la recarga (o recuperación de los niveles freáticos) es mayor en la microcuenca forestal. Esto es válido para las tres posiciones: cabecera, baricentro y posición baja, en la salida de las microcuencas. Probablemente se deba al enlentecimiento y menor escurrimiento superficial, producto de los residuos forestales existentes sobre la superficie del terreno. Asimismo, García Préchac *et al.* (2004) determinaron curvas características de retención de agua en el Uruguay y comprobaron que el suelo bajo *Eucalyptus* retiene menos agua a capacidad de campo y a todos los niveles de energía de retención aplicados. Delgado *et al.* (2006) señalan que estos resultados coinciden con los obtenidos por Musto (1993), en un estudio similar en Sudáfri-

ca, quien encontró las mismas diferencias de retención de agua entre suelos forestados y bajo pasturas, atribuyéndolo a diferencias en la distribución del tamaño de los poros y a la hidrofobicidad provocada por compuestos orgánicos en descomposición, presentes tanto en *Eucalyptus* como en *Pinus*. En los meses de verano, se observa que una vez que cesa el evento de precipitación, los descensos son mucho más pronunciados en la microcuenca forestal. Esto probablemente se deba a que el sistema radicular de los árboles es capaz de explorar un mayor volumen de suelo para satisfacer su demanda de agua. El ascenso de los niveles freáticos no está directamente asociado a la porosidad eficaz, estimada en un 20%, confirmando la existencia de fracturas o macroporos, de los conglomerados calcáreos identificados en los relevamientos geológicos. Si bien el número de eventos registrados es insuficiente aún para establecer conclusiones respecto al nivel de respuesta según la cobertura, los resultados son auspiciosos.

### 7.4 CALIDAD DE AGUAS

Con las limitaciones que impone el escaso número de análisis disponibles, se constata: 1) una disminución de pH y un aumento significativo de los sólidos totales disueltos, ortofosfatos y nitratos, en las muestras de precipitación fustal; 2) que las muestras de las microcuencas forestal y pasturas naturales, se ubican en rangos normales para cursos de aguas, aunque en los extremos en valores de iones de calcio, conductividad y dureza. Se trata, por tanto, de microcuencas muy calcáreas, que presentan un alto sistema de «tamponamiento», por lo que el pH se encuentra en valores entre neutros y ligeramente alcalinos.

La tendencia de funcionamiento diferente entre las microcuencas, por la que la mayoría de los parámetros analizados en la microcuenca forestal son menores que los observados en pasturas naturales, con excepción del K<sup>+</sup>, es consistente con la evolución de parámetros químicos de suelos bajo forestación observada por Hernández (2010).

## 7.5 EROSIÓN DE SUELOS

A partir del modelo USLE/RUSLE implementado para las condiciones locales en el software Erosión 5.0 (Hill *et al.*, 2008), se determinó el riesgo de erosión en las cuatro microcuencas bajo estudio, en distintas condiciones de pendiente y evaluando además la situación pre y pos cosecha de las microcuencas del establecimiento Santo Tomás. De acuerdo a los resultados obtenidos, en ninguna de las situaciones se supera el monto de pérdida de suelo tolerable para los suelos dominantes, el cual es de 7 Mg/ha.año.

Los muestreos de suelo fueron efectuados en sitios de referencia que se usarán como patrón de comparación y en condiciones de pre y poscosecha en las microcuencas del establecimiento Santo Tomás. Los resultados de Cs<sup>137</sup> en suelo obtenidos hasta el momento, muestran que es posible cuantificar su concentración hasta una profundidad de 25 cm. Además la distribución de la concentración de Cs<sup>137</sup> medida en el perfil de suelo del sitio elegido como referencia valida esta elección. La comparación con los primeros resultados obtenidos para la situación precosecha, muestra diferencias significativas en los perfiles de Cs<sup>137</sup> lo que indica claramente la pérdida de suelo debida posiblemente a la erosión.

Resta el análisis de los muestras de suelo en la situación poscosecha y las realizadas en la microcuenca ST2 cosechada bajo otras condiciones de contenido de humedad en suelo. Los resultados que se obtengan, serán utilizados para realizar una evaluación más ajustada de la magnitud del problema erosivo, facilitar sistemas de monitoreo y control de la erosión, y permitir detectar puntos críticos. También, se requieren para obtener una mejor comprensión del principal problema ambiental involucrado, para validar nuevos y existentes modelos de predicción y proporcionar las bases para seleccionar prácticas efectivas de conservación de suelos y mejorar estrategias de manejo, incluyendo evaluaciones de sus impactos económicos y ambientales (Zapata y García Agudo, 2000; Zapata, 2002).

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J.** 1986. An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, «SHE» 2: Structure of a physically based distributed modelling system. *J. Hydro.*, Amsterdam, 87, 61-77.
- ALONSO, J.; SILVEIRA, L.** 2008. «Modelación del cambio de uso del suelo en Uruguay: Aplicación del modelo Shetran». *Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena de Indias, Colombia.
- AMORÍN, C.; SILVEIRA, L.** 2008. «Sustitución de pasturas por plantaciones de *Eucalyptus* y sus efectos sobre la calidad de las aguas». *Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena de Indias, Colombia.
- ANDRÉASSIAN Y VAZKEN.** 2004. «Waters and forests: from historical controversy to scientific debate». *Journal of Hydrology* 291:1-27.
- BACHHUBER, H.; BUNZL, K.; SCHIMMACK, W.** 1982. The Migration of exp 137 Cs and exp 90 Sr in Multilayered Soils: Results From Batch, Column and Fallout Investigations. *Nucl. Technol.* Vol. 59, no. 2, pp. 291-301.
- 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.
- CALDER, I. R.** 1992. «The hydrological impact of land-use change». In: *Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineer Advisers Conference*, Southampton, July 1992, pp. 91-101.
- CALDER, I. R.** 2005. *Blue revolution: Integrated Land and Water Resource Management*. Earthscan, London, UK.
- CHESCHEIR, G.M.; SKAGGS, R.W.; AMATYA, D.M.** 2008. Hydrologic impacts of converting grassland to managed forestland in Uruguay. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment*. Concepción, Chile.

ASABE Publication Nr 701PO208cd.  
Eds. W.W. Tollner and A. Saleh.

- DE IZAGUIRRE, P.; ALONSO, J.** 2006. «Redistribución de precipitaciones en un monte de eucaliptos». *Jornada de Jóvenes Investigadores de AUGM*. Comité Aguas. Setiembre de 2006, Campinas, Brasil.
- DELGADO, S.; ALLIAUME, F.; GARCÍA PRÉCHAC, F.; HERNÁNDEZ, J.** 2006. Efecto De las plantaciones de Eucalyptus sp. Sobre el recurso suelo en el Uruguay. *Agrociencia*, Vol. X N° 2 95-107.
- GARCÍA PRÉCHAC, F.; AMARANTE, P.; DELGADO, S.; SALVO, L.; HILL, M.; CLÉRICI, C.; CALIFRA, A.; PÉREZ BIDEGAIN, M.** 2004. «Efecto de la intensidad de laboreo para la plantación de Eucalyptus dunnii sobre la acumulación de biomasa aérea, el crecimiento radicular y algunas propiedades físicas y químicas del suelo.» *Agrociencia* 5(1): 1-9.
- GASH, J.H.C.** 1979. «An analytical model of rainfall interception by forests». *Quart. J.R. Met. Soc.* 105, 43-55.
- HERNÁNDEZ, J.** 2010. Evolución de parámetros químicos de suelos bajo forestación: acidez, bases, materia orgánica. Jornadas de Actualización Técnica. 10 Años de Investigación en Producción Forestal. Productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Dpto. de Suelos y Aguas. Facultad de Agronomía.
- HILL, M.; GARCIA PRECHAC, F.; CLERICI, C.; HILL, E.** 2008. EROSION 5.0. Software basado en USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión para Uruguay y el sur de la cuenca del Plata. . I.C.E Special Report - UNESCO. , v. 5 , p. 69-75.
- HUBER, A.; IROUMÉ, A.** 2001. «Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile». *Journal of Hydrology*, 248:78-92.
- JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, 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
- KINDBOM, K.; SJÖBERG, K.; MUNTHE, J.; PETERSON, K.; PERSSON, C.; OCH ULLERSTIG, A.** 1997. «Nationell miljöövervakning av luft- och nederbörds-kemi» (Monitoreo Ambiental Nacional de la química del aire y la lluvia). *IVL B 1252*. Institutet för Vatten- och LuftvDrdsforskning (Instituto de Investigación del Agua y el Aire). Gotemburgo, Suecia. [en sueco].
- LEYTON, L.; REYNOLDS, E.R.C.; THOMPSON, F.B.** 1967. «Rainfall interception in forest and moorland». In: W.E. Sopper and H.W. Lull (Editors), *International Symposium on Forest Hydrology*. Pergamon, Oxford, pp. 163-178.
- LIMA, W.P.** 1992. *Impacto ambiental do Eucalipto*. EDUSP – Editora da Universidade de São Paulo, Brasil. 302 pp.
- LIMA, W.P.; ESAKIA, J.B.** 2006. *As florestas plantadas e a água: Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. RIMA Editora, 226 pp.
- MCCUTCHEON, S.C.; MARTIN, J.L.; BARNWELL JR., T.O.** 1993. «Water Quality». *Handbook of Hydrology*, editado por David R. Maidment. McGraw-Hill, Inc.
- MUSTO, J.** (1993). Impacts of plantation forestry and soil management. Institute for Commercial Forestry Research – Soth Africa. Annual Research Report 1993. pp 102-109.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V.** 1970. «River flow forecasting through conceptual models, part 1 - a discussion of principles». *J Hydrol.* 10: 282-290.
- RETEIA.** 2001. *Estudio de monitoreo ambiental de plantaciones forestales en el Uruguay. Informe Final*. PRENADER-UDELAR.
- RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C.** 1975. «A predictive model of interception loss in forest II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands». *Journal of Applied Ecology.* 12, 367-380.
- SAMPER CALVETE, F.J.** 1998. «Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres». *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 109(4), pp. 347-370).
- SILVEIRA, L.; ALONSO, J.; MARTINEZ, L.** 2004. Efecto de las plantaciones

- forestales sobre los recursos hídricos. Comparación de estudios en microcuencas y macrocuencas del Uruguay. *Memorias del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, San Pedro, Brasil.
- SILVEIRA, L.; ALONSO, J.** 2004. Modificación de los coeficientes de escorrentía producto del desarrollo forestal en una macrocuenca del Uruguay. *Memorias del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, San Pedro, Brasil.
- SILVEIRA, L.; ALONSO, J.; MARTÍNEZ, L.** 2006. «Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay». *Agrociencia*. Vol. X N° 2, 75-93.
- SILVEIRA, L.; DEIZAGUIRRE, P.; VISCA, M.** 2008. «Redistribución de la precipitación incidente en una plantación de *Eucalyptus* en Uruguay». *Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Cartagena de Indias, Colombia.
- SILVEIRA, L., ALONSO, J.** 2009. «Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay». *Hydrological Processes*. Vol. 23, 320-329. Editorial John Wiley. Publicado Online: 31/10/2008 en Wiley InterScience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)). DOI: 10.1002/hyp.7156.
- SOPHOCLEOUS, M.** 2004. Global and regional water availability and demand: prospects for the future. *Natural Resources Research*, Vol. 13, N°2: 61-75. DOI: 10.1023/B:NARR.0000032644.16734.f5
- TAMURA, T.** 1964. Selective sorption reactions of cesium with soil minerals. *Nucl. Safety*; Vol: 5: No. 3
- WALLING, D.E.; QUINE, T.A.** 1990. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation & Development* Vol 2: 161-175.
- WALLING, D.E.; QUINE, T.A.** 1993. Using Chernobyl-derived radionuclides to investigate the role of downstream conveyance losses in the suspended sediment budget of the River Severn, United Kingdom. *Physical Geography*. 14: 239-253.
- ZAPATA, F.** 2002. «Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations» (D.E.Walling, Q.He, P.G.Appleby) Capítulo 7, 111-162. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides. IAEA – Kluwer Academic Publishers, Holanda.
- ZAPATA, F.; GARCÍA AGUDO, E.** 2000. Future prospects for the <sup>137</sup>Cs technique for estimating soil erosion and sedimentation rates. *Acta Geologica Hispánica*, 35 (3-4): 197-205
- ZAPATA, F.** 2003. Handbook for the assesment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, IAEA – Kluwer Academic Publishers, Holanda.



---

Impreso en Editorial Hemisferio Sur S.R.L.  
Buenos Aires 335  
Montevideo - Uruguay

**Depósito Legal 356-200/11**

