

XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

PROGRAMA DE MONITOREO Y EVALUACION DEL IMPACTO DE LAS PLANTACIONES DE EUCALIPTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL URUGUAY

Ing. Luis Silveira, Ph.D.¹, Ing. Carlos Anido¹, Ing. Agr. Leticia Martínez²

1. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay
2. Dpto. de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay
“Luis Silveira” lesy@fing.edu.uy

RESUMEN

Durante las últimas décadas, el uso tradicional del suelo en el Uruguay ha experimentado modificaciones, resultando en un aumento significativo de las plantaciones forestales, principalmente eucaliptos y pino, al amparo de los estímulos dispuestos por el gobierno nacional. Esta situación, ha despertado reacciones en la sociedad, generando un debate nacional en cuanto a su impacto ambiental. Una evaluación del mismo requiere información sustentada localmente, motivo éste por el cual las autoridades competentes encomendaron, a las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República, la ejecución de un “Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con eucaliptos en el Uruguay”. El presente documento describe: a) objetivos del proyecto; b) equipamiento y estructuras de medición instalados en una microcuenca experimental con plantación de eucaliptos y su respectiva microcuenca testigo con campo natural para uso ganadero por cobertura vegetal, ubicadas en el Departamento de Tacuarembó, en la región centro-norte del país; c) marco metodológico para el análisis comparativo en tormentas; y d) resultados primarios para el período de datos procesados disponibles.

ABSTRACT

In Uruguay, the traditional soil use has undergone modifications during the last decade, resulting in a significant growth of forestry plantations, mainly eucalyptus and pinus, favoured by the facilities provided by the national government. Such modifications in soil use have rouse reactions in society, producing a national debate concerning its environmental impact, which requires local data to be assessed. Therefore, the responsible authorities committed the Faculties of Agronomy and Engineering, University of the Republic, to carry out a project concerning the “Installation of experimental small basins to study the environmental impact and to monitoring forestation programmes with eucalyptus in Uruguay”. This paper describes: a) the objectives of the project; b) the instrumental and measurement structures installed in a small basin with a eucalyptus plantation and a witness small basin covered with natural grass for livestock, located in the Tacuarembó Department, central-north region of Uruguay; c) the methodological frame to compare storm runoff; and d) the preliminary results from the available processed data.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de deforestación y reforestación representan, a escala global, la modificación del uso de la tierra más significativa, tanto por la superficie afectada como por la incidencia sobre los procesos hidrológicos (1).

En el Uruguay, el uso tradicional del suelo ha experimentado modificaciones, resultando en un aumento significativo de las plantaciones forestales, principalmente eucaliptos y pino, al amparo de los estímulos gubernamentales dispuestos por la Ley Forestal N° 15.239 de diciembre de 1987. En efecto, a partir de la reglamentación de la norma en 1989, la superficie forestada del país pasó de 45.000 hectáreas en 1990 a 557.000 hectáreas en 2001, representando el 15,9% del territorio de prioridad forestal.

El incremento de la plantación de eucaliptos en un país como el Uruguay, tradicionalmente agrícola – ganadero, donde las plantaciones forestales en gran escala representan para la comunidad y la opinión pública un elemento nuevo en la vida nacional (2, 3), ha generado un debate en la sociedad en cuanto a su impacto ambiental. La forestación industrial crea preocupación respecto a su impacto sobre los recursos hídricos (4), en particular respecto a que los árboles interceptan más precipitación y que, debido a un sistema de raíces más profundo en comparación con el estado natural bajo pastura, transpiran más agua durante los períodos de estiaje, afectando las napas subterráneas y los recursos de aguas superficiales ubicados aguas abajo. En este marco, propendiendo un manejo sustentable de las plantaciones forestales, la Dirección Forestal del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) formuló un “Proyecto de instalación de microcuencas experimentales para el estudio del impacto ambiental y monitoreo de programas de forestación con eucaliptos en el Uruguay”, encomendando su ejecución a las Facultades de Agronomía e Ingeniería de la Universidad de la República. Sucintamente, los objetivos generales del proyecto son los siguientes: i) establecimiento de un programa de investigación y monitoreo ambiental en el ámbito de las plantaciones de eucaliptos a gran escala; ii) búsqueda de indicadores del manejo sustentable de las plantaciones forestales; iii) instalación de dos microcuencas experimentales con plantaciones de eucaliptos y sus respectivas microcuencas testigos con campo natural por cobertura vegetal; iv) monitoreo continuo del impacto de las plantaciones forestales sobre el régimen hídrico (cantidad y calidad) y propiedades de los suelos, medido como impacto relativo a la situación natural bajo pastura para uso ganadero; y v) obtención de información que pueda servir para mejorar las prácticas de manejo forestal y disminuir el impacto ambiental.

En este trabajo se presentan los fundamentos conceptuales y metodológicos de la investigación; una descripción de las instalaciones dispuestas, en el Departamento de Tacuarembó, para el monitoreo de los procesos hidrológicos; y se centra en la metodología utilizada para medir el impacto de las plantaciones de eucaliptos sobre la escorrentía, tomando como medida de comparación una microcuenca testigo, con campo natural para uso ganadero por cobertura vegetal; y documenta avances preliminares de la investigación resultantes de procesar datos correspondientes a los primeros seis meses de monitoreo.

MARCO METODOLOGICO

Fundamentos conceptuales

Una premisa básica para adoptar la instalación de microcuencas experimentales como herramienta de estudio consiste en aceptar que las actividades que modifican el uso del

suelo, en este caso particular la plantación forestal con eucaliptos, causan algún efecto sobre los recursos hídricos, produciendo cambios en la cantidad y calidad, así como sobre las principales propiedades de los suelos, características asociadas y erodabilidad; factores éstos que pueden identificarse como indicadores del impacto a medio y largo plazo de los programas de forestación (5).

El incipiente monitoreo ambiental, como parte de los programas de forestación en gran escala en el Uruguay, se enfoca no sólo para evaluar la calidad ambiental del manejo forestal adoptado en un instante y sitio determinado, sino también como herramienta para obtener información que posibilite permanentemente mejorar las prácticas de manejo forestal, propendiendo la sustentabilidad.

Metodología

Este documento abarca aquellos componentes del proyecto que refieren al análisis de los efectos de la forestación con eucaliptos sobre los recursos hídricos en cuanto a cantidad, medido como impacto relativo a la condición natural de suelos bajo pasturas para uso ganadero. La metodología adoptada consiste en la comparación de cada uno de los procesos que participan del ciclo hidrológico y, en particular, la redistribución de la precipitación incidente sobre el monte de eucaliptos (6); análisis del escurrimiento en tormentas; y determinación del balance hídrico mensual, estacional y anual.

En particular, atendiendo a la información actualmente disponible, el presente trabajo se centra en el análisis comparativo de la escorrentía en tormentas. A efectos de facilitar el análisis comparativo, el criterio fundamental adoptado para seleccionar el cierre de las microcuencas ha sido imponer igualdad de tiempos de concentración. En efecto, este parámetro ha prevalecido sobre el parámetro área en la selección del sitio de cierre, puesto que igualdad de áreas y tiempos de concentración diferentes producirían para un mismo evento hidrogramas con un desfase de los tiempos en que se genera el caudal pico, la consideración de diferentes duraciones de lluvia en la generación del caudal pico, y tiempos base de los hidrogramas diferentes, lo que dificultaría el análisis comparativo. Por consiguiente, adoptado el criterio de iguales tiempos de concentración, la diferencia en área de las microcuencas se toma en cuenta manejando caudales pico específicos (caudales por unidad de área) y escurrimientos específicos (lámina de escurrimiento por unidad de área).

Area de estudio

A partir de la selección de predios forestados, realizada por la Contraparte de la Dirección Forestal, se identificaron un total de 70 microcuencas en las zonas de prioridad forestal más relevantes del país. Estas microcuencas se caracterizaron, con información predial e identificación de las correspondientes fotos áreas, por parámetros físicos e hidrológicos habituales en estudios hidrológicos. Seguidamente, en base al análisis realizado, se visitaron los sitios más favorables, seleccionándose finalmente dos microcuencas en el Departamento de Tacuarembó, Establecimiento "La Abuelita", al que se accede en el km 363 de la Ruta 5, en la zona centro-norte del país. En la Tabla 1 se presentan los parámetros físicos más relevantes y los tiempos de concentración de ambas microcuencas, calculados según el método de Kirpich (7).

La caracterización de las cuencas se completó con la elaboración de una serie de mapas en escala 1:10.000, comprendiendo curvas de nivel a intervalos de 2 metros, suelos, geología y vegetación.

Parámetro	Microcuenca forestal	Microcuenca testigo (Campo natural)
Area (ha)	68.0	108.0
Pendiente media de la microcuenca (%)	5.1	11.4
Longitud del cauce principal (km)	1.1	1.4
Pendiente del cauce principal (%)	2.1	2.6
Tiempo de concentración (min)	20.0	21.0
Coordenadas del cierre (X,Y)	(476.8 , 6468.3)	(474.3 , 6468.1)

Tabla 1. Parámetros físicos e hidrológicos de las microcuencas seleccionadas

Los suelos dominantes de la cuenca son del tipo Luvisol Ocríco e Inceptisol Umbrico, mientras que la geología del área se compone de rocas del Triásico Jurásico asociadas a la Formación Tacuarembó; éstas rocas a su vez están parcialmente recubiertas por lavas de edad Cretácico Inferior, básicas, de la Formación Arapey. La vegetación, como se ha señalado, está constituida por plantaciones forestales de eucaliptos en una de las microcuencas y campo natural para uso ganadero en la microcuenca testigo.

Instrumentación

Atendiendo a los procesos hidrológicos que intervienen en el régimen hídrico de una *microcuenca forestal*, la instrumentación consta de: una estructura de cierre similar al cuerpo de una pequeña presa de tierra, provista en la zona central con un vertedero de cresta delgada, de tipo combinado triangular - rectangular, con capacidad para registrar caudales en el rango 0 - 14 m³/s (ver Figura 1); un limnógrafo electrónico de boya; dos pluviómetros; instrumental complementario para registro de la precipitación (medidas de interceptación y escurrimiento fustal); baterías de tensiómetros, tubos de acceso para sonda de neutrones y bloques de yeso para la determinación de la evolución del agua en el suelo; y tres piezómetros para el monitoreo de la variación del nivel de la napa freática.



Figura 1. Vista, desde aguas arriba, del cierre ubicado en la microcuenca en monte forestal, constituido por un terraplén provisto con vertedero de lámina delgada, de tipo triangular-rectangular, en su zona central

La instrumentación de la *microcuenca testigo*, con campo natural por cobertura vegetal, consta de: una estructura de cierre similar a una pequeña presa de tierra, provista en la zona central con un vertedero de cresta delgada, de tipo combinado triangular - rectangular, con capacidad para registrar caudales en el rango 0 - 14 m³/s, éste último correspondiente a un período de retorno estimado de 25 años; un limnógrafo electrónico de boya; una estación meteorológica que comprende: un pluviógrafo electrónico, un pluviómetro, un tanque evaporímetro tipo "A" y un gabinete para termómetros equipado con un juego de termómetros de máxima y mínima y un psicrómetro de mano para medida de humedad relativa; baterías de tensiómetros, tubos de acceso para sonda de neutrones y bloques de yeso para la determinación de la evolución del agua en el suelo; y dos piezómetros para el monitoreo de la variación del nivel de la napa freática.

Puesto que el proyecto de investigación también comprende el estudio del impacto de la forestación sobre la calidad de las aguas de lluvia y aguas en cauce, y procesos de pérdida de suelo, la instrumentación de las microcuencas incluye: red de muestreo de aguas de lluvias; dos torres de muestreo de sedimentos en suspensión en cauce; y parcelas de escurrimiento en ambas microcuencas, según la metodología de trabajo desarrollada por García y Cardellino (8). El proyecto también abarca estudios comparativos y evolución de las propiedades de los suelos (9).

La instrumentación se ha implementado progresivamente durante la primera mitad de 2000, contando los árboles de la plantación forestal con 5 años de edad.

RESULTADOS PRELIMINARES

Los resultados preliminares que se presentan a continuación se centran en el análisis de eventos registrados en el período comprendido entre el 1º de junio y el 30 de noviembre de 2000.

La Figura 2 muestra los datos de precipitación diaria registrados en la estación meteorológica ubicada en la microcuenca con campo natural por cobertura vegetal. Obsérvese que los registros de precipitación diaria no superan los 50 mm/día para el período considerado y, por lo tanto, corresponden a tormentas con períodos de retorno bajos, que son justamente los que en mayor medida se ven afectados por la reducción de los aportes de lluvia a nivel del suelo (6). Esta precisión es sumamente importante puesto que en la región no son infrecuentes eventos de precipitación que alcanzan o superan los 150 mm/día. Por consiguiente, se comprende que las conclusiones que puedan extraerse en esta etapa de avance de la investigación están sujetas a las limitaciones que impone la información procesada actualmente disponible.

Los datos de altura limnimétrica registrados en cada una de las microcuencas se transformaron a datos de caudal aplicando la relación altura – caudal vertido, determinada en laboratorio mediante la implementación de un modelo físico con el que se calibró la zona de transición entre el vertedero triangular y el vertedero rectangular (10). En la Figura 3 se muestran los escurrimientos específicos diarios registrados en ambas microcuencas, expresados en mm/día, a efectos de prescindir de las diferencias existentes en superficie entre una microcuenca y otra; observándose una sensible reducción en la escorrentía producto de eventos en la microcuenca forestal. Por consiguiente, a continuación se analizan los caudales pico y los escurrimientos específicos, es decir, caudales y escorrentía por unidad de área, correspondientes a eventos identificados en la Figura 3.

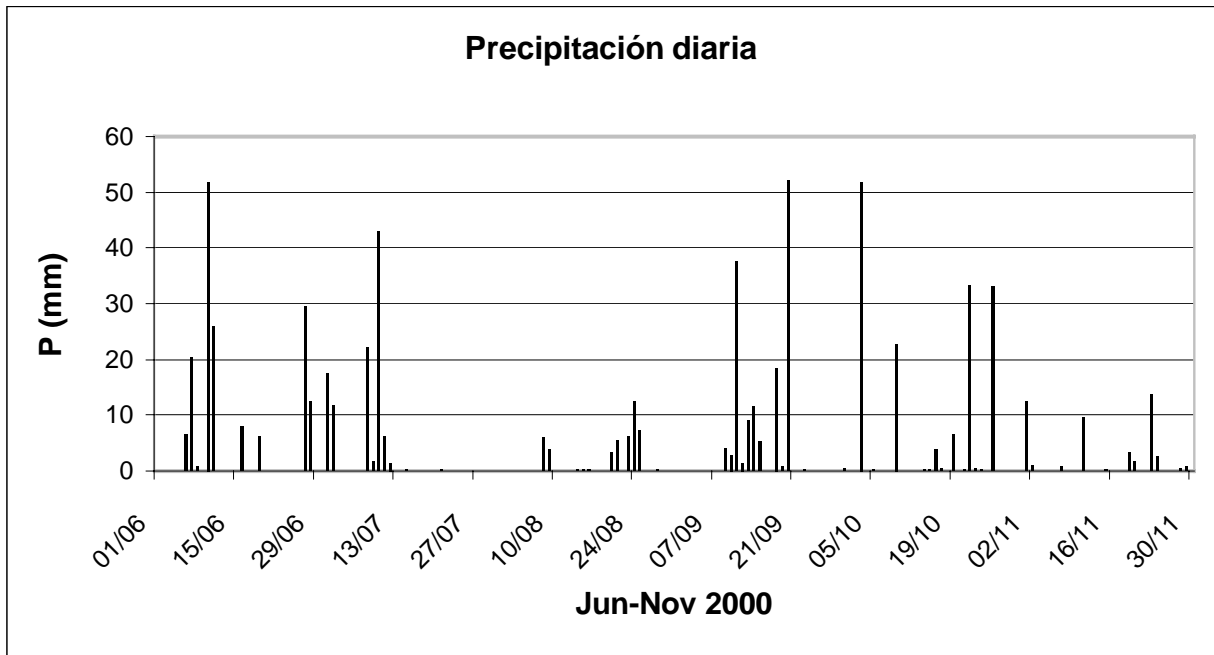


Figura 2. Datos de precipitación diaria registrados en el período invierno-primavera de 2000 en la estación meteorológica, sita en la microcuenca en campo natural

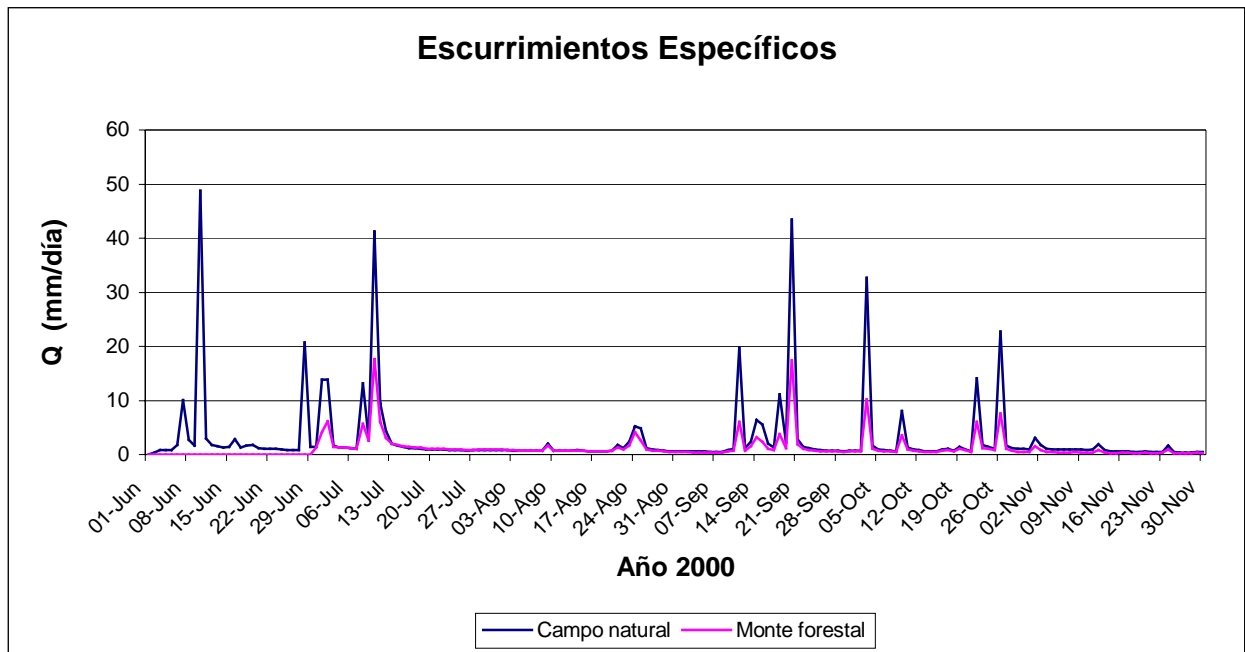


Figura 3. Escurrecimientos específicos diarios registrados en los vertederos de las microcuencas (campo natural y monte forestal)

La Figura 4 expresa la correlación existente entre los caudales pico específicos medidos en campo natural y en monte forestal. La correlación lineal que pasa por el origen de coordenadas muestra que los caudales pico específicos en la microcuenca forestal representan tan solo un 20,8% del correspondiente caudal pico registrado en la microcuenca en campo natural, representando por lo tanto una reducción de 79,2%. La función objetivo propuesta por Nash y Sutcliffe (11), coeficiente $R^2 = 0,8595$, próximo a uno, indica un buen ajuste entre ambas series de datos.

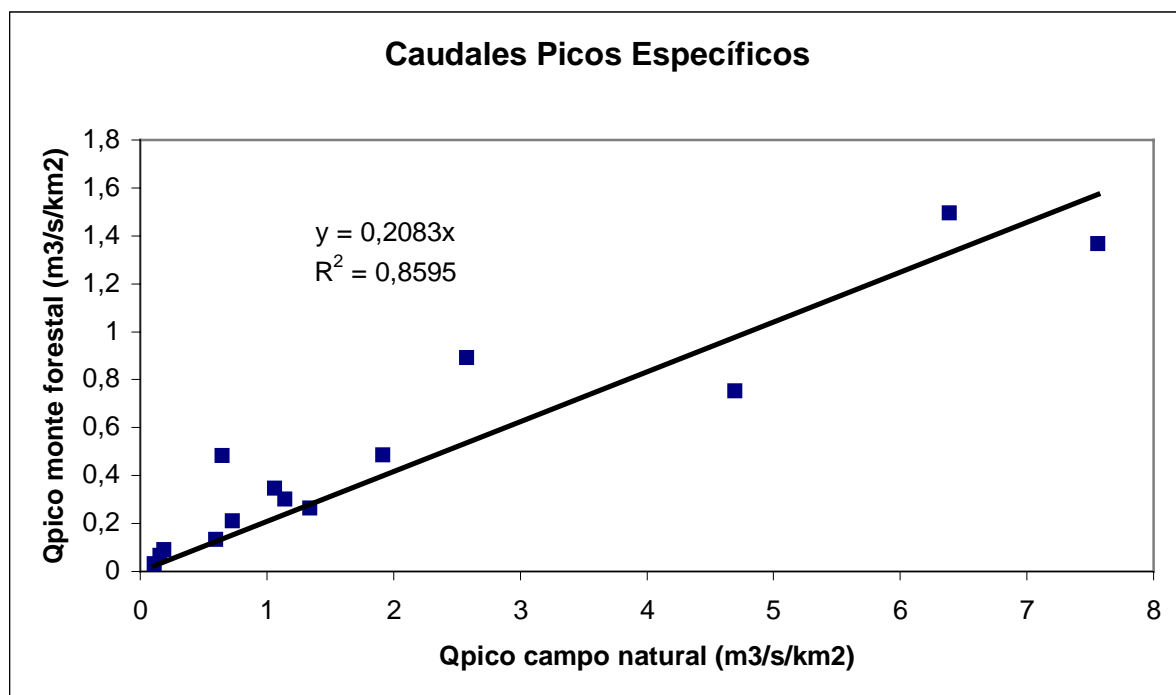


Figura 4. Relación entre caudales picos específicos escurridos en campo natural y en monte forestal

En la Tabla 2 se presentan los datos utilizados para generar la Figura 4 y, en la última columna, se expresa el porcentaje de reducción del caudal pico específico en monte forestal respecto a campo natural. La reducción promedio para los eventos considerados es 68,5 %, observándose variaciones entre 51,0 y 83,9%, así como un único evento en que la reducción del caudal pico es tan sólo de un 25,5%.

Fecha	Precipitación (mm)	Qpico específico (m ³ /s/km ²)		Reducción (%)
		Campo Natural	Monte de eucaliptos	
11.11	9,7	0,109	0,031	71,7
14.09	11,4	0,157	0,066	58,0
01.11	12,5	0,186	0,091	51,0
25.08	7,1	0,596	0,134	77,6
24.08	12,5	0,647	0,482	25,5
09.10	22,9	0,727	0,210	71,1
22.10	33,3	1,061	0,347	67,3
18.09	18,5	1,144	0,303	73,5
26.10	33,0	1,342	0,263	80,4
08.07	22,1	1,915	0,487	74,6
10.07	42,9	2,577	0,893	65,4
11.09	37,6	4,693	0,754	83,9
20.09	52,1	6,386	1,496	76,6
03.10	51,8	7,559	1,366	81,9
Promedio:				68,5

Tabla 2. Relación entre caudales pico específicos en campo natural y en monte forestal

La Figura 5 muestra, para los mismos eventos, la correlación existente entre los escurrimientos específicos, observándose que en la microcuenca forestal éstos se reducen en un 59,1% respecto a la escorrentía en la microcuenca en campo natural. También en este caso se obtiene coeficiente un coeficiente $R^2 = 0,929$, muy próximo a uno, que indica un muy buen ajuste entre ambas series de datos.

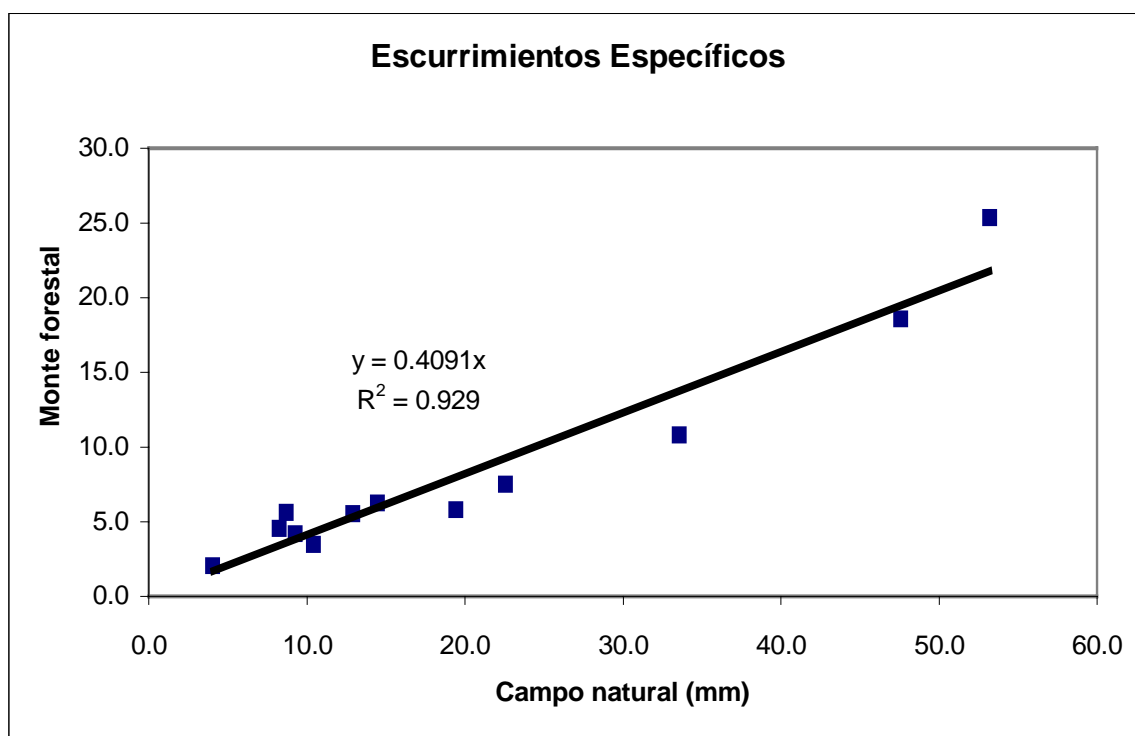


Figura 5. Relación entre escurrimientos específicos en campo natural y en monte forestal

Fecha	Precipitación (mm)	Escorrentía específica (mm)		Reducción (%)
		Campo Natural	Monte de Eucaliptos	
01.11	12,5	4,1	2,0	50,1
09.10	22,9	8,3	4,5	45,4
24.08	12,5	8,7	5,6	35,3
14.09		9,3	4,2	54,4
18.09	18,5	10,5	3,5	66,9
08.07	22,1	12,9	5,5	57,4
22.10	33,3	14,5	6,2	56,9
11.09	37,6	19,5	5,8	70,0
26.10	33,0	22,6	7,5	66,9
03.10	51,8	33,6	10,8	67,9
20.09	52,1	47,6	18,6	61,0
10.07	42,9	53,2	25,4	52,3
Promedio:				57,0

Tabla 3. Relación entre la escorrentía específica en campo natural y en monte forestal

En la Tabla 3 se presentan los datos utilizados para generar la Figura 5 y, en la última columna, se expresa el porcentaje de reducción de la escorrentía específica en monte forestal respecto a campo natural. La reducción promedio para los eventos considerados es 57,0 %, semejante al valor obtenido con el análisis de correlación que se presenta en la Figura 5. No obstante, se observan variaciones en el porcentaje de reducción por evento entre 35 a 70 %.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las microcuencas experimentales instaladas constituyen un laboratorio natural por excelencia, permitiendo estudios cuantitativos del efecto integrado de los procesos hidrológicos y, en un futuro, el análisis de diferentes prácticas de manejo forestal, según lo proponen Moldan y Cerny (12). Por lo tanto, el proyecto constituye un primer eslabón hacia el conocimiento del impacto ambiental de los programas de forestación con eucaliptos en el Uruguay y la búsqueda de información/indicadores de manejo sustentable, para corregir y mejorar las prácticas de manejo forestal. Conviene señalar, no obstante, que la investigación se encuentra en una fase inicial, disponiéndose aún de escasa información. Por ese motivo, los resultados preliminares que se presentan en este documento se centran en el análisis de eventos registrados en el período inicial de monitoreo, que abarca tan sólo seis meses correspondientes al período invierno – primavera de 2000. Se observa que la escorrentía específica se reduce en la microcuenca forestal promedialmente en 57 a 59% respecto a la escorrentía específica en la microcuenca en campo natural. Asimismo, los caudales pico específicos asociados a estos eventos representan, en la microcuenca forestal, una reducción promedio del 69 al 79% en relación al correspondiente caudal pico registrado en la microcuenca en campo natural. Si bien se percibe una tendencia clara en cuanto a la reducción de la escorrentía específica y caudales pico específicos, la extensión de los datos monitoreados no permite aventurar conclusiones definitivas, hasta tanto no se cuente con una serie más extensa de datos y una mayor representatividad de la variabilidad de los eventos de precipitación. En efecto, los eventos analizados corresponden a eventos de lluvia entre 7 a 52 mm/día, que corresponden a tormentas con períodos de retorno bajos, que son los que en mayor medida se ven afectados por la reducción de aporte de lluvia a nivel del suelo por intercepción debida a las copas de los árboles; en tanto que eventos que alcanzan o superan los 150 mm/día no son infrecuentes en la región bajo estudio.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Calder, I.R. (1992) "The hydrological impact of land-use change with special reference to afforestation and deforestation", *Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineers Advisers Conferece*. Southampton, July 1992, Overseas Development Administration, pp. 91-101.
- (9) Durán, A., García Préchac, F., Pérez Bidegain, M., Friori, M., Sicardi, L., Molteri, C. y Bozzo, A. (2001) "Parte B – Suelos", en Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Informe Final. Universidad de la República.
- (10) Duran, P., Silveira, L., Anido, C., Martínez, L., Chamorro, A. González, J.C., Zanetti, E., Alonso, J., Hayashi, R. "Parte A – Hidrología", en Estudio de Monitoreo Ambiental de Plantaciones Forestales en el Uruguay. Informe Final. Universidad de la República.

- (8) García, F. y Cardellino, G. (1983) Metodología empleada en Parcelas de Esgurrimiento y avance de los resultados obtenidos en Aguas Blancas. Publicación interna de la División Uso y Manejo del Agua. Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger". Dirección de Suelos. Ministerio de Agricultura y Pesca.
- (4) Iroumé, A. (1997) Estudio de los procesos hidrológicos en una cuenca experimental forestal andina de la IX Región, Chile. *Bosque* 18(1): 73-81.
- (6) Iroumé, A. y Huber, A. (2000) Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque* 21(1): 45-56.
- (7) Kirpich, Z.P. (1940) Time of concentration of small agricultural watersheds, *Civ. Eng.*, vol. 10, No. 6, p. 362.
- (3) Lima, W.P. (1997) Impactos ambientales de los programas de forestación. *Forestal (Revista de la Sociedad de Productores Forestales del Uruguay)*. Segunda época - Año 2 - No. 5, 3-8.
- (12) Moldan, B. y Cerný, J. (1994) "Small Catchment Research". En "Biogeochemistry of Small Catchments. A Tool for Environmental Research", de Moldan & Cerný (editores). John Wiley & Sons.
- (11) Nash, J.E. y Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- (2) Panario, D.H. (1991) Hacia una evaluación de efectos ambientales de la forestación en Uruguay con especies introducidas. CIEDUR, Serie Investigaciones No. 85.
- (5) Swank, W.T. y Johnson, C.E. (1994) "Small Catchment Research in the Evaluation and Development of Forest Management Practices". En "Biogeochemistry of Small Catchments. A Tool for Environmental Research", de Moldan & Cerný (editores). John Wiley & Sons.