

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**MODELACIÓN DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN URUGUAY:
APLICACIÓN DEL MODELO SHETRAN**

Jimena Alonso y Luis Silveira

*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. J. Herrera y Reissig 565, C.P. 11200 Montevideo, Uruguay.
jalonso@fing.edu.uy, lesy@fing.edu.uy*

RESUMEN:

A partir de la década del '90 el Uruguay experimentó un significativo incremento de la superficie afectada a la forestación industrial, convirtiéndose éste en el cambio de uso de suelo más controversial para la opinión pública. En este marco, se estableció un programa de investigación y monitoreo en dos microcuencas experimentales en el Departamento de Paysandú, con el propósito de establecer indicadores de manejo forestal sustentable. Este trabajo presenta el avance logrado en el estudio de los efectos de la actividad forestal sobre la cantidad del recurso hídrico, mediante la aplicación de un modelo hidrológico de base física y espacialmente distribuido: SHETRAN. En primer lugar se realiza la calibración del modelo SHETRAN en ambas microcuencas y con los parámetros obtenidos se simula la aforestación de la microcuenca actualmente bajo pastura. Se presentan también la información de caudal monitoreada en cada microcuenca entre junio de 2006 y diciembre de 2007 y se analizan las relaciones entre ambas series a nivel de eventos así como de volúmenes acumulados. Aún con las limitaciones que implica el corto período de monitoreo y la falta de caracterización física de algunos parámetros del suelo y la vegetación, se logra una aceptable calibración del modelo lo cual permite acercarse a un objetivo más ambicioso: disponer de una herramienta de predicción de los efectos de la forestación para la gestión del recurso hídrico.

ABSTRACT:

Since the nineties Uruguay has experienced a significant increment of the forested area, nowadays it has become the most controversial land use change on public opinion. According to this, an investigation and monitoring program was established in two experimental small basins in Paysandú, with the purpose of establishing indicators of sustainable forest management. This paper presents the advances of the research about the effects of the forest activity on water resources quantity, achieved by the application of a physically based and spatially distributed hydrological model: SHETRAN. In first term SHETRAN is calibrated in both microcatchments, then with the obtained set of parameters the afforestation of the grassland catchment is simulated. It is also presented the observed runoff data of each microcatchment between July 2006 and December 2007 and the relationships between them are analysed on event and cumulated volume bases. Even with the limitations given by the short data series, an acceptable calibration is achieved which allows to get closer of a more ambitious aim: to have a prediction tool of the afforestation effects to use on water resources management.

PALABRAS CLAVES: Modelación numérica, aforestación, efectos hidrológicos

INTRODUCCIÓN

En la última década, la forestación comercial con especies exóticas se ha transformado en el cambio de uso de suelo más controversial en el Uruguay. En particular la forestación a gran escala con Eucalyptus ha generado voces de alerta respecto a sus impactos medioambientales, en especial altos consumos de agua y erosión de suelos, así como también por los efectos socio-económicos asociados.

Debido a su repercusión en la evapotranspiración, los cambios de uso en el suelo, como la forestación, afectan en forma importante tanto la disponibilidad como la distribución temporal de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. También son considerables los efectos causados por estos cambios en la rugosidad superficial y las características del suelo. Estos efectos si bien son ampliamente conocidos (Calder, 2005) no son simples de predecir debido a que la superposición con otros factores como el clima y el efecto de escala los hacen difíciles de aislar para su estudio particular.

Los efectos de la aforestación en la cantidad de los recursos hídricos de Uruguay han sido estudiados dentro del programa de investigación de la Universidad de la Republica, principalmente mediante la comparación de los registros hidrológicos de cuencas de pastura con cuencas forestadas hidrológicamente similares. El coeficiente de escorrentía es una herramienta muy útil para estudiar las relaciones entre los cambios de uso de suelo y los cambios en el escurrimiento. Estudios realizados en una cuenca de 2000 km² en Uruguay muestran las tendencias de reducción del coeficiente de escorrentía entre los períodos pre-forestación y pos-forestación para la misma cuenca (Silveira et al, 2006). Sin embargo es evidente la necesidad de utilizar herramientas más potentes para definir y cuantificar los efectos de cada factor sobre la disponibilidad del recurso hídrico. En este sentido el rol de la modelación hidrológica ha sido largamente probado.

Los modelos hidrológicos, de base física y espacialmente distribuidos, son una herramienta poderosa para predecir los efectos del cambio de uso del suelo en cuencas, principalmente debido al significado físico de sus parámetros (Bathurst et al, 1995). Esto hace posible especificar valores representativos del cambio de uso del suelo modificando las características de la cuenca.

OBJETIVO

El objetivo de este estudio es simular los efectos de la sustitución de pasturas naturales por plantaciones forestales sobre la disponibilidad del recurso hídrico en microcuencas experimentales en Uruguay.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área De Estudio

La zona de estudio se localiza en el departamento de Paysandú en la zona noroeste del Uruguay. La Universidad de la República instrumentó y monitorea desde el año 2005 dos microcuencas experimentales, según se observa en la Figura 1, de aproximadamente 1km² de superficie, distantes 4 Km. entre si: Don Tomás y La Cantera. Sus cauces principales son la Cañada Baigorria y la cañada de la Quinta, respectivamente. Ambos cauces son afluentes del Arroyo Capilla Vieja en su margen izquierda.

Posteriormente se simuló la forestación de La Cantera bajo cobertura vegetal de Eucalyptus. Para esto los parámetros de vegetación y rugosidad superficial fueron tomados de la calibración de Don Tomás, mientras que se mantuvieron incambiadas las demás características.

El Modelo Hidrológico SHETRAN

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

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

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

Las principales estructuras de cálculo del SHETRAN son las columnas (Figura 2). Las redes de canales se modelan como conexiones y el resto de la cuenca como un conjunto de columnas. Cada columna contiene muchas celdas de diferencias finitas, una sobre otra, y cada una debe estar asociada a un tipo de roca, suelo o cobertura vegetal

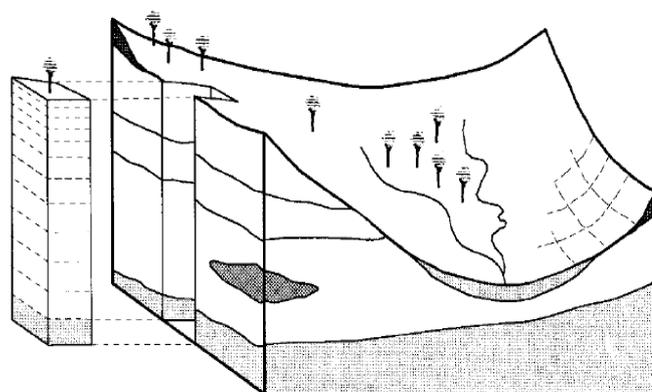


Figure 2.- Esquema del SHETRAN en columnas y celdas (Ewen et al. 2000)

Los principales procesos dentro del componente hidrodinámico del SHETRAN están representados por las ecuaciones de la Tabla 2, la mayoría de las cuales son ecuaciones en derivadas parciales (Ewen et al., 2000):

Tabla 2- Principales procesos y ecuaciones en el componente hidrodinámico del SHETRAN

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

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

Información de entrada: Series de precipitación y evapotranspiración potencial

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

- Tamaño y posición de las columnas, conexiones de cauce y celdas de diferencias finitas
- Tipo de suelo/roca y profundidad para cada columna
- Uso de suelo/vegetación para cada columna
- Parámetros de drenaje del dosel y capacidad de almacenamiento
- Resistencia del dosel y resistencia aerodinámica
- Distribución en profundidad de la densidad radicular de la vegetación
- Porosidad y almacenamiento específico de los suelos/rocas
- Funciones de potencial matricial de suelos/rocas
- Funciones de conductividad no saturada de suelos/rocas
- Conductividad hidráulica saturada en suelos/rocas
- Condiciones iniciales

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

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

Implementación Del Modelo

Información de entrada

La información de entrada para implementar SHETRAN fue precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y presión atmosférica, monitoreadas en ambas microcuencas entre Mayo de 2006 y Abril de 2007. La evapotranspiración potencial fue calculada mediante la ecuación combinada de Penman y la evapotranspiración de cada cobertura vegetal aplicando la ecuación de Penman-Monteith. La precipitación fue ingresada al modelo con paso de cinco minutos y la evapotranspiración con paso horario.

Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo fueron determinados en campo o estimados en base a bibliografía. De esta forma se describieron ambas microcuencas con respecto a: topografía, geología, suelos, vegetación y uso del suelo.

Topografía

Para la implementación del SHETRAN, la cuenca de Don Tomas fue representada por una grilla de 850 elementos de 50x50 m, mientras que La Cantera se representó por 479 elementos de las mismas dimensiones. El sistema de cauces es representado por SHETRAN a lo largo de las fronteras de los elementos de la grilla (Figuras 3 y 4). De acuerdo a los relevamientos topográficos realizados en campo, las secciones de los cauces se representaron con forma trapezoidal con un ancho de base variable entre 0.50m y 5m.

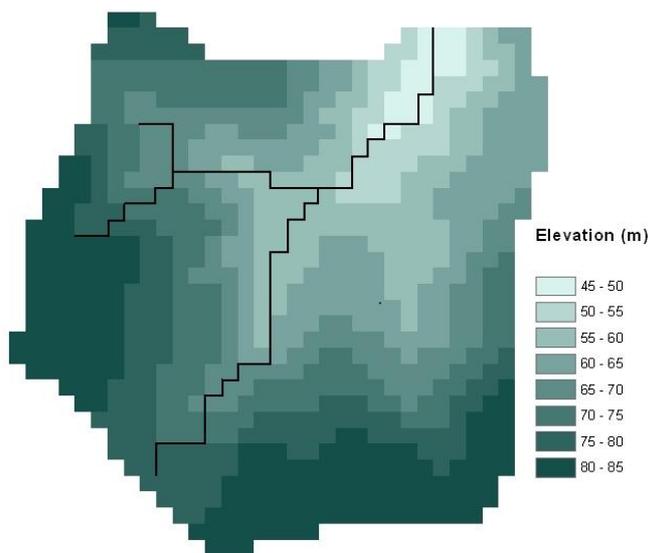


Figura 3.- Grilla, distribución de elevaciones y sistema de canales de Don Tomás

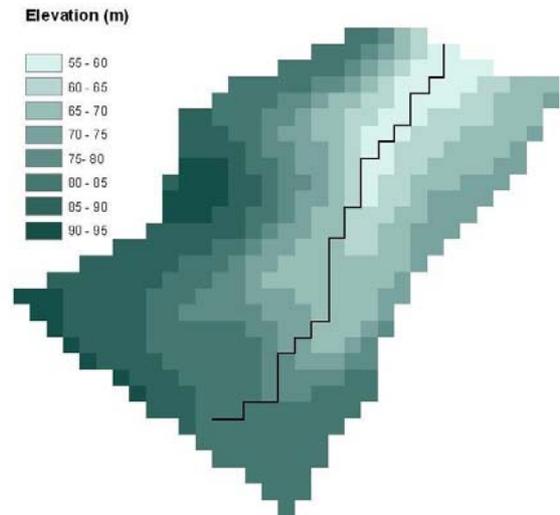


Figura 4.- Grilla, distribución de elevaciones y sistema de canales de La Cantera

Suelos

Los suelos son principalmente arenosos y areno-arcillosos de origen Cretácico, mientras que en las cabeceras de las cuencas se encuentran suelos arcillosos y limo-arcillosos de origen Cuaternario. La descripción espacial de los suelos se obtuvo de un mapa a escala 1:20.000 confeccionado en base a fotos aéreas de la zona e información relevada en campo. De acuerdo a esta información existen cuatro tipos de suelo distintos en cada cuenca, como se observa en la Tabla 3. Debido a las semejanzas de los distintos suelos identificados en La Cantera para la implementación se consideró un solo tipo de suelo con profundidad variable, mientras que para Don Tomás se mantuvo la clasificación original

Tabla 3.- Clasificación de suelos en las microcuencas

Tipo	Profundidad (m)	Clasificación
Don Tomás		
1	0.7	SC
2	0.9	SCL
3	0.7	C
4	1.5	CL
La Cantera		
1	0.7	SL
2	0.7	SL
3	1	SL
4	2	CL

Hasta el momento no han sido analizadas en laboratorio las características físicas de los suelos, por lo tanto los valores de los parámetros correspondientes a cada tipo de suelo fueron tomados de bibliografía (SHETRAN User's guide Appendix A) y usados como valor inicial en la calibración.

Vegetación

La cubierta vegetal en Don Tomás es en un 54% de la superficie Eucalyptus y el restante 46% pastura, mientras que en La Cantera la única cubierta vegetal es pastura. Ambas microcuencas son usadas eventualmente para pastoreo de ganado tanto ovino como bovino pero no existen registros sobre el manejo o la producción.

La caracterización de la plantación en Don Tomas fue realizada en Agosto del 2005 y se describe como una plantación de la especie *Eucalyptus globulus ssp. Maidenii*, plantada en el año 1998, con una altura media de 14.9m, un DAP (diámetro altura de pecho) de 14 cm y una densidad de 895 árboles /ha

La distribución espacial de la plantación de *Eucalyptus* en Don Tomas se muestra en la Figura 5.

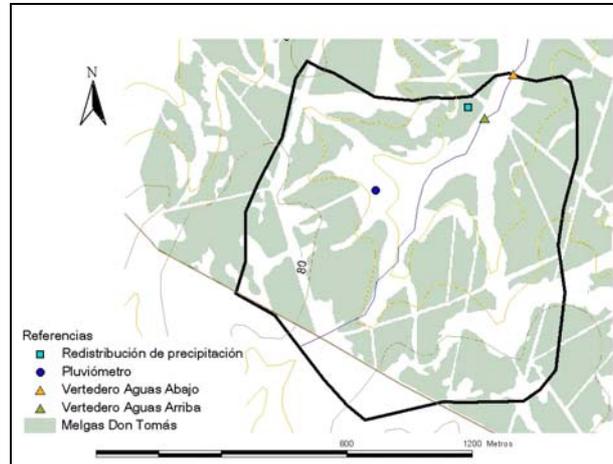


Figura 5- Distribución espacial de la plantación

Variables

La variable de calibración elegida es el escurrimiento superficial medido a la salida de cada microcuenca.

En el cierre de cada cuenca existen vertederos triangulares de lámina delgada (Figuras 6 y 7) para medir caudales bajos y medios (<1.0 m³/s). La curva de aforo de estos vertederos queda establecida por la siguiente ecuación:

$$Q(m^3 / s) = \frac{8}{15} \cdot C_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \tan(\theta / 2) \cdot (h + k_h)^{2.5}$$

donde:

θ : ángulo de abertura del vértice del vertedero

C_e y k_h : coeficientes empíricos correspondientes a θ ($\theta = 90 \rightarrow C_e = 0.58$ y $k_h = 0.087$)

h : nivel de agua sobre el vértice del vertedero ($0 \leq h \leq 0.90m$)



Figura 6.- Vertedero y obras anexas en Don Tomás



Figura 7.- Vertedero y obras anexas en La Cantera

Con el objetivo de determinar caudales mayores a 1.0 m³/s, se calibró el modelo hidrodinámico HEC-RAS, en ambas cañadas.

CALIBRACIÓN DEL MODELO

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

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

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

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Análisis de la información monitoreada

Se realizó el análisis doble masa sobre los registros de escurrimiento en ambas cuencas, con paso diario. El objetivo de este análisis fue el de identificar y analizar la constante de proporcionalidad entre los caudales erogados en ambas cuencas así como también identificar quiebres en la curva, que normalmente pueden indicar fallas en el registro, pero que en este caso nos indican cambios hidrológicos que afectan la relación entre las variables.

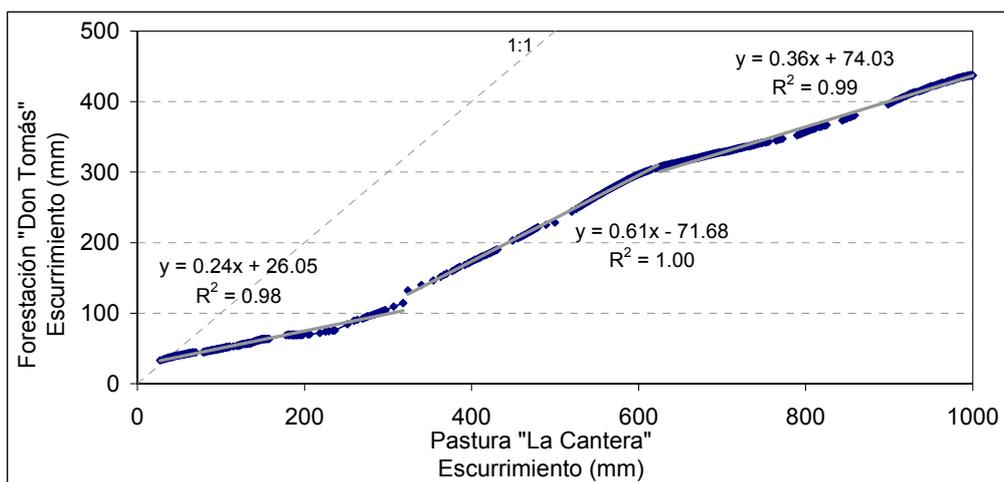


Figura 8.- Análisis doble masa de escurrimientos observados

De acuerdo al análisis de la Figura 8, pueden definirse tres períodos distintos. El primer período entre el 1/06/06 y 27/03/07 muestra la mayor reducción de escurrimiento en la cuenca forestada respecto a la pastura (76%), es el período mas seco de toda la serie registrada y se caracteriza por eventos de escurrimiento aislados. En este período los coeficientes de escurrimiento fueron 0.13 en Don Tomás y 0.27 en La Cantera. El segundo período entre el 28/03/07 y el 16/06/07 fue el más húmedo lo que hace que las descargas de ambas cuencas sean más parecidas mostrando una reducción del escurrimiento de 39%, los coeficientes de escurrimiento estuvieron en 0.60 para Don

Tomás y 0.90 para La Cantera. Por último el tercer período, que va hasta Diciembre de 2007, se ubica entre los anteriores con una reducción del escurrimiento en la forestación respecto al de la pastura de 64% y coeficientes de escorrentía de 0.24 para Don Tomás y 0.70 para La Cantera.

Finalmente se analizó la relación entre caudales máximos observados en cada cuenca para el mismo evento de precipitación (Figura 9). Luego de realizar una selección, debido a la disponibilidad de información, quince eventos fueron elegidos. La relación que se presenta en la Figura 8, muestra una reducción promedio de 44% para los caudales máximos en la cuenca forestada respecto a los de la cuenca de pasturas.

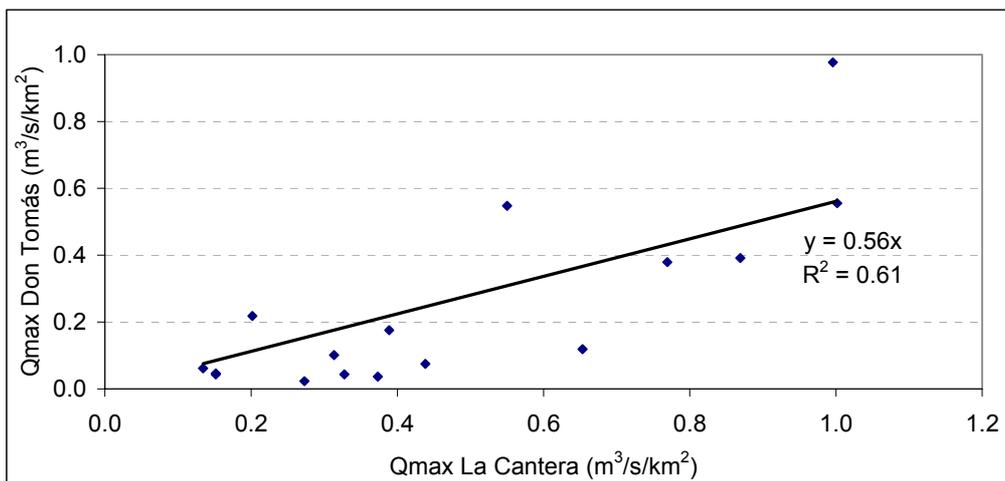


Figura 9.- Análisis de la relación entre caudales máximos en ambas cuencas

Calibración del modelo en las dos microcuencas

Se han logrado valores aceptables para las funciones de calibración, siendo en La Cantera el número de Nash 0.67 y el error en el volumen 4%, mientras que en Don Tomás el número de Nash fue de 0.73 y el error en el volumen 10%. Sin embargo hasta el momento y con las limitaciones que impone la información disponible, la representación de eventos de baja magnitud, no es muy ajustada, como se muestra en los períodos seleccionados para las Figuras 10 y 11.

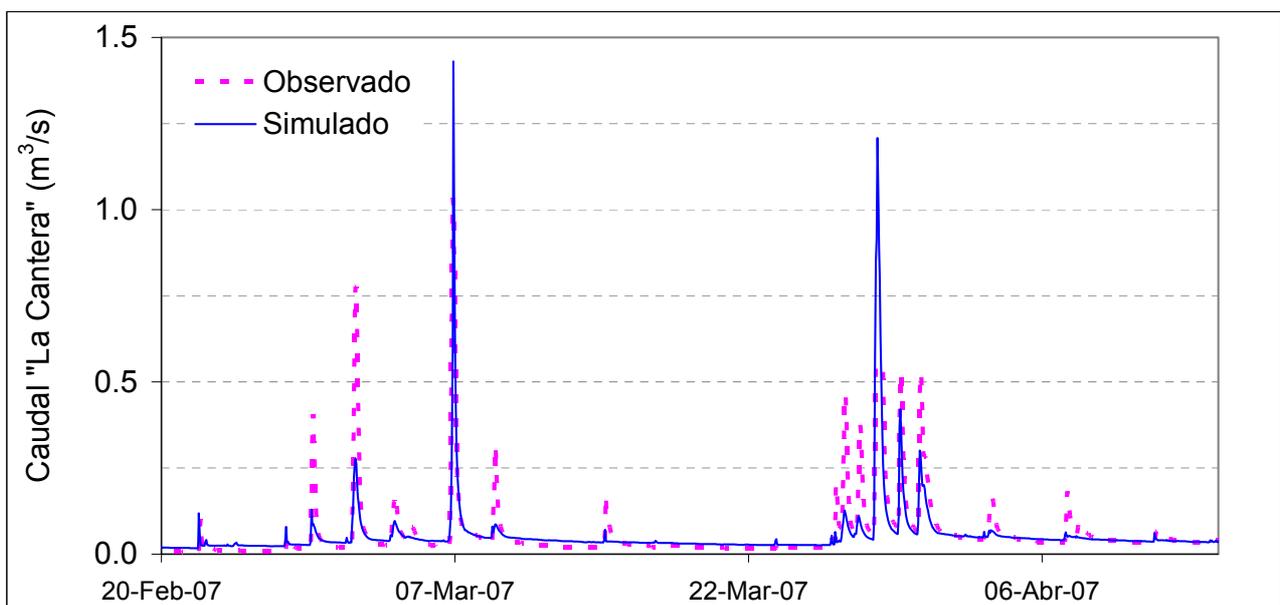


Figura 10.- Comparación de caudales observados y simulados en La Cantera

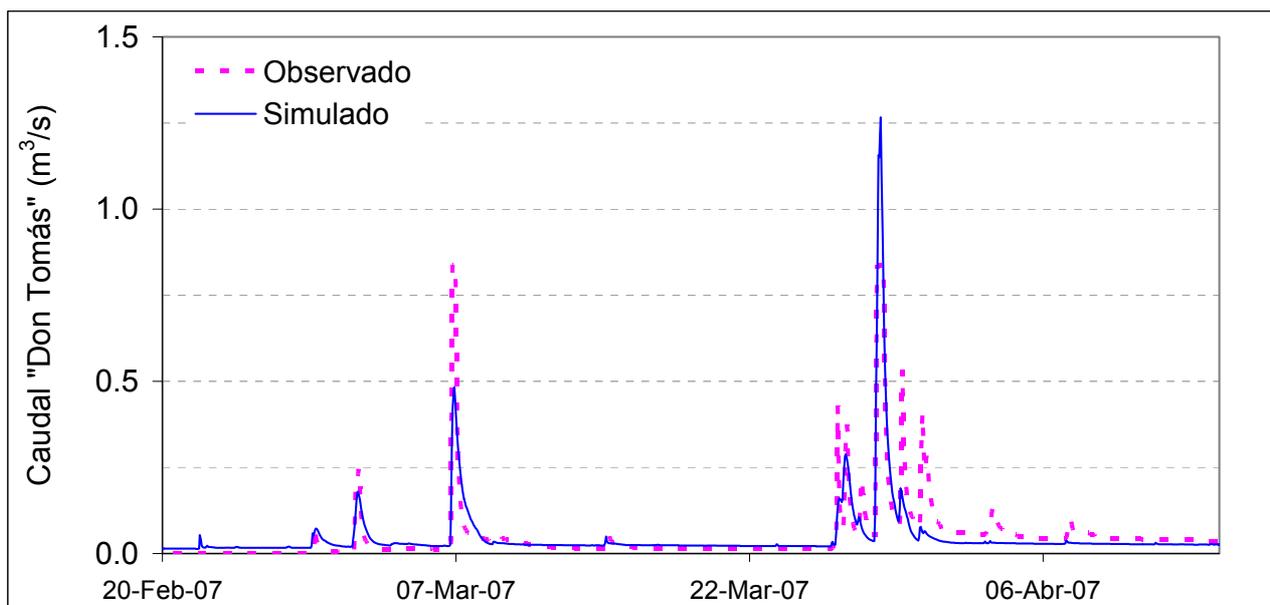


Figura 11.- Comparación de caudales observados y simulados en Don Tomás

En las Tablas 4 y 5 se resumen los principales parámetros obtenidos con la mejor simulación obtenida en cada microcuenca.

Tabla 4.- Principales parámetros calibrados en La Cantera

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

Tabla 5.- Principales parámetros calibrados en Don Tomás

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

Simulación de la aforestación en La Cantera

La comparación de escurrimientos con y sin forestación simulados para La Cantera muestra, como era de esperar, que la forestación produce menores respuestas en los picos e incrementa los tiempos base de los hidrogramas (Figura 12). Por otra parte no se aprecian diferencias significativas entre los flujos base.

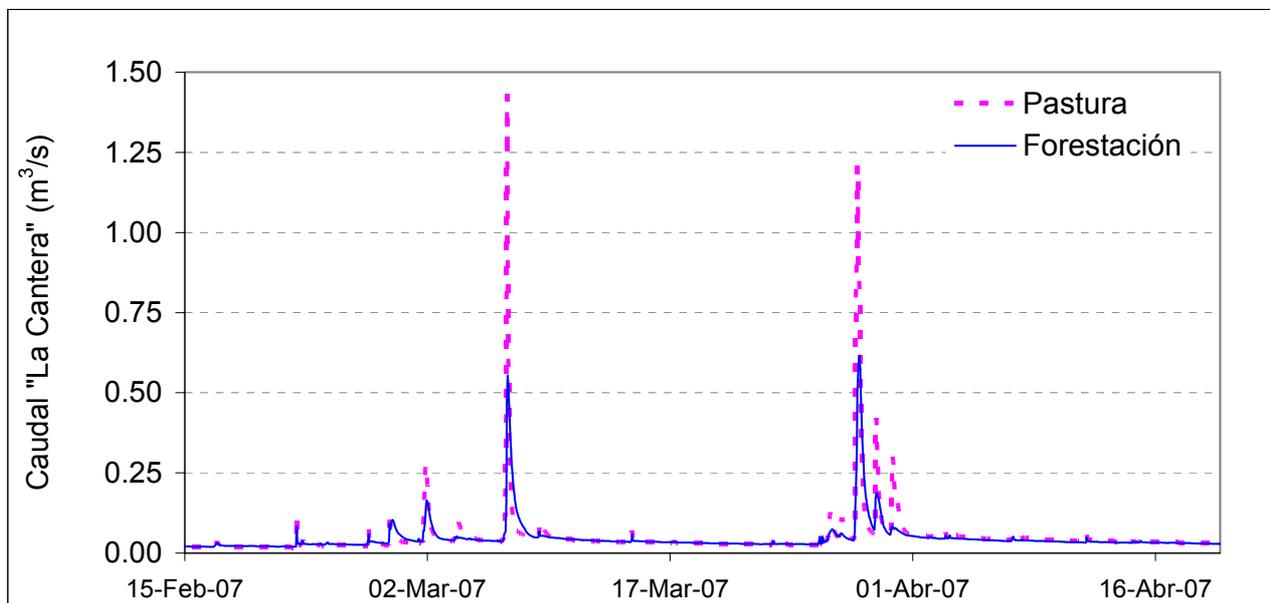


Figura 12.- Comparación de caudales simulados con pastura y con forestación en La Cantera

En la Tabla 6 se resumen los volúmenes escurridos a nivel mensual en ambos casos y se determina el efecto de la aforestación sobre la cantidad del recurso hídrico medido como porcentaje de reducción respecto al volumen de la pastura. La tendencia no es clara ya que existen meses en los que se da una reducción y otros un aumento del volumen escurrido, finalmente en el volumen global se aprecia una reducción del 4%, que no es significativa ya que es menor al error obtenido en las calibraciones.

Tabla 6.- Diferencias de volumen mensual en las simulaciones

Fecha	Volumen (mm/mes)		Diferencia
	Cuenca con pastura	Cuenca aforestada	
Jun-06	190	158	17%
Jul-06	79	72	10%
Ago-06	51	50	2%
Sep-06	42	43	-3%
Oct-06	54	59	-9%
Nov-06	64	68	-6%
Dic-06	126	130	-3%
Ene-07	58	63	-9%
Feb-07	46	52	-12%
Mar-07	150	131	13%
Abr-07	57	51	10%
Acumulado	918	877	4%

CONCLUSIONES

El modelo SHETRAN ha sido calibrado con aceptable eficiencia en las dos microcuencas bajo estudio: La Cantera cubierta de pasturas y Don Tomás con vegetación predominante de *Eucalyptus*. A partir de estos resultados fue posible realizar la simulación de la forestación con *Eucalyptus* de una cuenca y evaluar los efectos de este cambio de uso del suelo en la disponibilidad de los recursos hídricos. En los resultados preliminares se visualiza claramente la reducción de la respuesta de la cuenca a eventos de precipitación así como también cierta reducción en los escurrimientos totales. Sin embargo era esperable encontrar mayores reducciones en los flujos base y los escurrimientos totales. La explicación puede radicar en que las calibraciones previas hayan estado excesivamente centradas en los parámetros relacionados a las características del suelo y no diferenciaron suficientemente los parámetros de las distintas coberturas vegetales, lo cual se relaciona con el concepto de “equifinality” ya citado.

Sin duda se requiere continuar trabajando para alcanzar mejores resultados tanto en la simulación del escurrimiento como en la simulación de los procesos internos de la cuenca: intercepción del dosel, contenido de humedad en el suelo, nivel de agua subterránea. Es imprescindible un mayor período de datos relevados, para contar con un período de calibración más extenso y mejorar la calidad de las simulaciones. Igualmente resulta notoria la necesidad de trabajar sobre la caracterización física de los parámetros, tanto de la vegetación: mediante determinaciones del LAI (índice de área foliar) en la plantación de *Eucalyptus*; como trabajo de laboratorio en la caracterización física de los suelos, para de esa forma acotar la variación de los parámetros relacionados.

Finalmente consideramos que este estudio contribuye a centrar la atención en los principales procesos y parámetros que describen la hidrología de estas microcuencas y gracias a ello se estará en condiciones de un mejor aprovechamiento de las posibilidades del modelo SHETRAN en el corto plazo.

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 este artículo, así como también la estadía de capacitación en SHETRAN realizada en la Universidad de Newcastle en el Reino Unido, han sido financiados por el Programa de Desarrollo Tecnológico PDT) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Los autores agradecemos especialmente al Prof. James Bathurst y a Steven Birkinshaw por su valiosa colaboración en la realización del estudio cuyos resultados presentamos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O’Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, “SHE” 2: Structure of a physically based distributed modelling system. *J. Hydro.*, Amsterdam, 87, 61-77.

Adams, R.; Parkin, G.; Rutherford, J.C; Ibbitt, R.P and Elliott, A.H. (2005) “Using a rainfall simulator and a physically based hydrological model to investigate runoff processes in a hillslope” *Hydrol. Process.* 19, 2209–2223.

Bathurst, J. C., Ewen, J., Parkin, G., O'Connell, P. E. and Cooper, J.D. (2004) "Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 3. Blind validation for internal and outlet responses". *J. Hydro.* 287, 74-94

Bathurst, J. C., Wicks, J.M., O'Connell, P.E. (1995). The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. *Computer Models of Watershed Hydrology*, V. P. Singh, ed., Water Resources Publications, USA. Chapter 16.

Beven, K., Freer, J. (2001). "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology". *J. Hydrol.* 249, 11-29.

Calder, I.R (2005). *Blue revolution: Integrated Land and Water Resource Management*. Earthscan. London, UK.

Ewen, J., Parkin, G., O'Connell, P.E. (2000) "SHETRAN: Distributed river basin flow and transport modelling system". *Journal of Hydro Engineering*, 3, 250-258.

Lukey, B.T.; Sheffield, J.; Bathurst, J.C.; Hiley, R.A.; Mathys, A. (2000) "Test of the SHETRAN technology for modelling the impact of reforestation on badlands runoff and sediment yield at Draix, France" *J. Hydrol.* 235, 44-62.

Silveira, L., Alonso, J., Martinez, L. (2006) "Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay". *Agrociencia*. Vol X, No2, 75-93.