

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**APLICACIÓN DE UN MODELO SIMPLE PARA DETERMINAR LA  
VARIACIÓN EN EL CONSUMO DE AGUA AL MODIFICAR LA  
CUBIERTA VEGETAL**

*Leticia Martínez<sup>1)</sup>, Luis Silveira<sup>2)</sup>, Jimena Alonso<sup>2)</sup>, Magdalena Crisci<sup>2)</sup>, Santiago Symonds<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía; Montevideo – Uruguay

<sup>2)</sup>Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Montevideo – Uruguay.  
Universidad de la República

[lmartinez@fagro.edu.uy](mailto:lmartinez@fagro.edu.uy), [lesy@fing.edu.uy](mailto:lesy@fing.edu.uy), [jalonso@fing.edu.uy](mailto:jalonso@fing.edu.uy), [mcrisci@fing.edu.uy](mailto:mcrisci@fing.edu.uy), [ssymonds@fing.edu.uy](mailto:ssymonds@fing.edu.uy)

**RESUMEN:**

El sector forestal en el Uruguay ha experimentado un marcado desarrollo en las últimas dos décadas, pasando de 45.000 a 1.000.000 de hectáreas cultivadas con *Eucalyptus spp.* y *Pinus spp.*, afectando intensamente el uso del suelo en algunas zonas del país. Este trabajo presenta el desarrollo de un Modelo Simple, que permite calcular el consumo de agua en una cuenca o parcela cuando se modifica el uso del suelo, parcial o totalmente, desde pastura a forestación o viceversa. El modelo se basa en la información hidrológica, monitoreada durante tres años, en dos microcuencas experimentales sometidas a diferentes manejos (pastura natural y forestación con *Eucalyptus globulus ssp. Maidenii*). Para ello, se estimó la evapotranspiración realizando balances hídricos mensuales para ambas microcuencas. Seguidamente, analizando períodos de tiempo trimestrales, se correlacionó la evapotranspiración estimada y la precipitación, para cada cobertura. El modelo considera estas relaciones y el porcentaje que ocupa cada tipo cobertura, para evaluar la variación del consumo de agua a nivel estacional frente a un cambio, total o parcial, en la cobertura vegetal. Conviene señalar que el modelo sobreestima la evapotranspiración anual en un 11,6% de la lluvia anual, si se la compara con la calculada por el modelo de Zhang. Esta diferencia probablemente explica la percolación, término que en el balance hídrico fue adicionado a la evapotranspiración estimada por carecer de datos.

**ABSTRACT:**

The forestry sector in Uruguay has experienced a marked development in the last two decades. The forested area with *Eucalyptus spp.* and *Pinus spp.* increased from 45.000 to 1.000.000 ha, affecting intensely the soil use in some regions of the country. This paper presents the development of a Simple Model which allows estimating the water consumption and its variation in a basin or a plot. The model is useful to analyze the soil use modification, partially or totally, from pastures to forest or vice versa. It is based on hydrological data, monitored during three years, in two microbasins with different soil use management (natural pastures and forestation with *Eucalyptus globulus ssp. Maidenii*). The evapotranspiration was estimated by the monthly water budget for both watersheds. Then, the evapotranspiration was correlated with rainfall, by considering 3-month time step periods for each coverage type. The model considers these relationships and the percentage occupied by each coverage type, to evaluate the seasonal variation in water consumption. It should be noted that the model overestimates annual evapotranspiration by 11.6% of annual rainfall, when compared with that calculated by the model of Zhang. This difference probably explains the percolation, a term in the water budget which was added to the estimated evapotranspiration due to the lack of data.

**PALABRAS CLAVES:** forestación, evapotranspiración, modelación

## INTRODUCCIÓN

En los últimos 25 años, el sector forestal en el Uruguay ha experimentado un marcado desarrollo, afectando intensamente el uso del suelo en algunas zonas del país. Este cambio generó que extensas áreas destinadas a la ganadería, en base a pasturas naturales, se utilicen actualmente para la forestación. Desde la aprobación de la Ley Forestal N° 15.939 promulgada en 1987, el área cultivada principalmente con *Eucalyptus spp.* y *Pinus spp.*, pasó de 45.000 hectáreas en 1990 a 1.000.000 hectáreas a fines de 2009. El desarrollo pronunciado del sector en el corto plazo en cuanto al área cultivada, conjuntamente con un marcado dinamismo industrial, el cual genera una demanda cada vez mayor de productos forestales, ha generado preocupación en la sociedad y en las instituciones nacionales con respecto a su impacto sobre los recursos naturales, en particular suelos y aguas.

Desde hace varias décadas existen controversias sobre el impacto que genera la forestación o deforestación sobre el ciclo del agua. El clima, la geología, los suelos, la topografía, son las variables que generan diferencias en el impacto ocasionado sobre los recursos hídricos cuando se modifica la cobertura vegetal. 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 (Calder, 1992). Para coberturas de Pinos o *Eucalyptus* se ha estimado variaciones de 40 mm el escurrimiento superficial, a nivel de cuenca, por cada 10% de cambio en la cubierta forestal, sin embargo en especies de hoja caduca y arbustivas los resultados son de 25 y 10 mm respectivamente. Bosch, et. al (1982).

Los efectos que producen los cambios de vegetación sobre el rendimiento de agua y evapotranspiración a nivel de cuenca han sido evaluados en un gran número de experimentos: los que abarcan el análisis de los cambios producidos a nivel de una misma cuenca, evaluando el impacto generado por la forestación o deforestación y los que comprenden estudios realizados en dos cuencas de similares características en cuanto a suelo, topografía, área, características hidrológicas, clima y geología: “cuencas apareadas”.(Zhang, 1999; Bosch, 1982 ; Brown, 2005, Soares, 2004). Sin embargo, son necesarias otras metodologías que permitan predecir los efectos de los cambios en el manejo de la cobertura vegetal, en este sentido son varios los modelos empíricos desarrollados que permiten evaluar el impacto de la forestación sobre los recursos hídricos. (Zhang, 1999; Holmes y Sinclair, 1986; Lu, 2003).

Un modelo simple de dos parámetros para estimar la evapotranspiración media anual a escala de cuencas para dos tipos de vegetación: forestal y pasturas fue desarrollado por Zhang et al (1999, 2001). Su estudio se basó en el análisis de los resultados obtenidos en 250 estudios alrededor del mundo, con diferentes tipos de vegetación a través de un gradiente de precipitación. Considera que el principal proceso responsable de los cambios en el ciclo hidrológico como resultado de alteraciones en la vegetación, para una escala anual, es la evapotranspiración.

En igual sentido, Lu et al (2003) desarrollaron un modelo de regresión para estimar la evapotranspiración anual, en cuencas con forestación como vegetación dominante, a través del sudeste de Estados Unidos. El objetivo fue obtener un modelo que permita cuantificar la evapotranspiración regional y cómo ésta es afectada por la precipitación y la cobertura del suelo. Determinaron que las variables ambientales más importantes que explicaron la variabilidad espacial de la evapotranspiración regional fueron: precipitación, latitud, elevación y porcentaje del área afectada por forestación.

La comprensión del impacto de la vegetación en el rendimiento de agua medio anual se encuentra avanzada y hay disponibles métodos confiables para predecir tales cambios, sin embargo, los efectos en los flujos estacionales, mensuales y diarios se encuentran menos comprendidos. Estos

últimos pueden ser tan o más importante que el impacto sobre el flujo total anual. Actualmente no existen modelos propuestos que contemplen la variación de los escurrimientos estacionales a cambios en la vegetación, consecuencia principalmente de la naturaleza cualitativa y gráfica de muchos de los flujos estacionales reportados en la literatura, a partir de los cuales se han desarrollado los modelos de base anual (Brown et al 2005). A una escala de tiempo estacional otras características de la cuenca tales como tipo, profundidad y contenido de agua en el suelo determinan interacciones de importancia que afectan significativamente el balance hídrico, modificando las respuestas con respecto a cuándo se trabaja en períodos anuales (Brown et al, 2005; Johnson y Kovner, 1956).

Como se mencionó anteriormente, a nivel internacional existe información referente a los efectos ocasionados en el ciclo hidrológico cuando se producen cambios en el uso del suelo, pero la variedad de especies y ambientes estudiados no permiten generalizarla a nuestras condiciones, es necesario generar información que considere las características locales de clima, suelo, geología y del uso y manejo del suelo. Con tal objetivo en el año 1998 las Facultades de Ingeniería y Agronomía de la Universidad de la República, en el marco de la Red Temática de Ingeniería Agrícola, iniciaron un programa de investigación y monitoreo en macrocuencas, microcuencas y parcelas forestadas. Contar con indicadores sobre los cambios en el ciclo hidrológico, resultantes de las modificaciones realizadas en el uso del suelo, proveerá a los sectores involucrados de la información necesaria para sustentar la toma de decisiones políticas con la finalidad de lograr un Manejo Forestal Sustentable. (Silveira et. al. 2006)

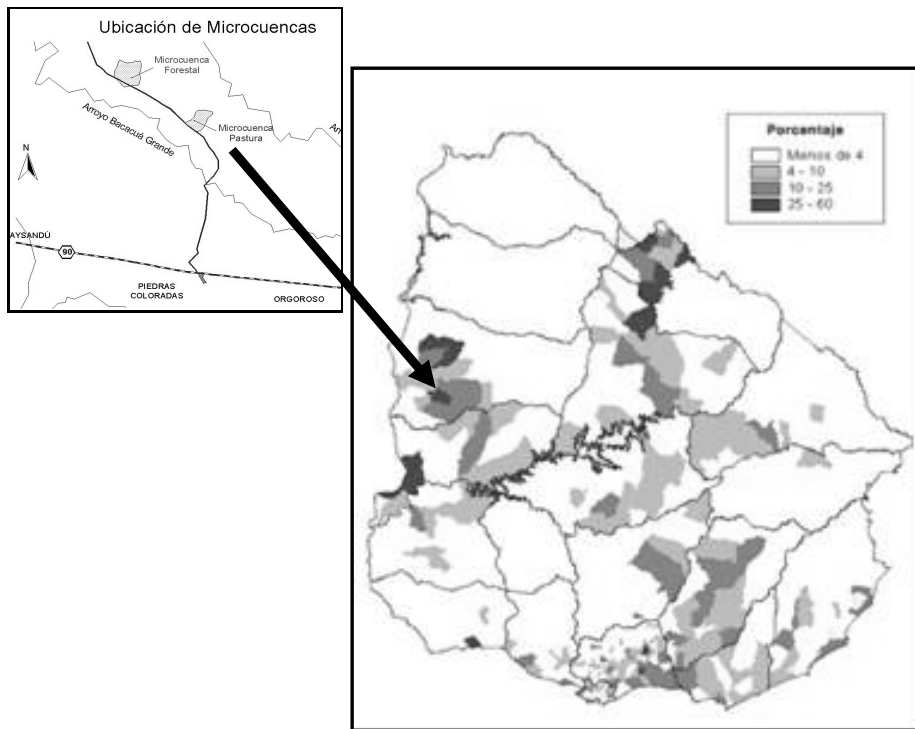
El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo simple de cálculo, que permita estimar las variaciones en el consumo de agua en una cuenca o parcela cuando se modifica parcial o totalmente el uso del suelo, desde pastura a forestación o viceversa. El propósito es generar una herramienta, incorporando las características climáticas y edáficas locales, que permita evaluar los efectos generados sobre los recursos hídricos a partir de un cambio en el uso del suelo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **a) Área de estudio**

El sitio de estudio se encuentra en la zona litoral oeste del Uruguay, 15 km al norte de la población Piedras Coloradas, km 48,5 de Ruta N° 90, departamento de Paysandú, ubicación 34° 25' latitud sur y 55° 23' de longitud oeste, a 100 msnm, con un promedio anual de temperatura y precipitación de 18°C y 1200mm respectivamente. La elección de la zona de estudio obedece a su representatividad en cuanto al rubro forestal (Figura 1).

Se seleccionaron dos microcuencas, una con cubierta de pasturas naturales, situada en el establecimiento “La Cantera” y otra bajo manejo forestal, situada en el establecimiento “Don Tomás”. Los cauces principales son la “Cañada de La Quinta” y “Cañada Baygorria” respectivamente, los cuales son afluentes del Arroyo Capilla Vieja. Los parámetros físicos que caracterizan ambas microcuencas pueden observarse en la siguiente Tabla 1.



**Figura 1.-** Localización del sitio de estudio

**Tabla 1.-** Parámetros físicos característicos de ambas microcuencas.

Parámetros físicos	Microcuenca Forestal	Microcuenca Pastura
Área (km <sup>2</sup> )	2.12	1.20
Perímetro (km)	5.81	4.58
Long. Cauce (m)	1783	2168
Pend. de cauce (%)	0.90	1.58
Pend. media cuenca (%)	4.68	5.92
Tiempo de concentrac. (min)	39.0	36.5

El relevamiento de suelos a escala 1:20.000 en ambas microcuencas determinó que en la zona alta predominan suelos que clasifican como Brunosoles Subéuticos y Vertisoles Rúpticos . Por debajo del interfluvio aplanado se encuentran sucesivos niveles de escarpas formadas por materiales cretácicos consolidados con afloramientos rocosos. El nivel superior de escarpas, inmediatamente por debajo del interfluvio, está constituido por materiales con alto contenido de calizas, en cuyas áreas de retroceso se desarrollan suelos francos a arenoso francos profundos identificados como Brunosoles Subéuticos Típicos. En las zonas mas bajas se encuentran suelos pardos muy diferenciados texturalmente (Argisoles Dístricos), asociados a suelos superficiales o muy superficiales (Litosoles Subéuticos).

La similitud en las características geológicas, geomorfológicas y de distribución de los suelos en ambas microcuencas aporta validez a la metodología de estudio seleccionada, en la cual éstas serán utilizadas como elementos de comparación frente a los diferentes usos de los suelos (forestal – pastura).

La vegetación en la microcuenca forestal está compuesta por *Eucalyptus globulus* en un 55% del área y pastura natural en el 45% restante. La caracterización de la plantación al momento de la instalación del experimento se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2.- Características de la plantación forestal**

<b>Especie</b>	<i>Eucalyptus globulus ssp. Maidenii</i>
<b>Edad al 2006</b>	8 años (fecha implantación Otoño-Prim 1998)
<b>DAP medio</b>	14 cm
<b>Altura media</b>	14.9 m
<b>Densidad</b>	895 árboles/ha

Debajo de la cobertura forestal se encuentra una vegetación rala y de bajo porte compuesta principalmente por carquejas, (*Baccharis sp.*). Las zonas desprovistas de árboles tienen una composición botánica propia de pasturas naturales: *Baccharis sp.*, *Bromus sp.*, *Paspalum sp.* y *Stipas sp.*. La microcuenca de pastura presenta una vegetación de gramíneas de ciclo invernal asociada a una vegetación de parque de algarrobos (*Prosopis sp.*) en las zonas altas.

### b) Metodología

El estudio se desarrolló a través de la metodología de “cuencas apareadas”, una bajo manejo forestal y otra con pasturas naturales para uso ganadero. En ambas coberturas se estimó el consumo de agua, como evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>), para períodos de tiempo estacionales, a partir de la aplicación de la ecuación de balance hídrico a paso de tiempo estacional. La determinación de los diferentes componentes del balance se realizó mediante la instrumentación y registro de datos hidrológicos a nivel mensual en ambas microcuencas.

La precipitación total incidente (Pt) sobre la microcuenca forestal se registró mediante un pluviógrafo digital marca Rainwise, instalado en la zona central de la microcuenca en un claro libre de árboles. Conjuntamente, dentro del monte, fue medida la precipitación que atraviesa directamente el follaje (Pd) y la fracción que escurre por ramas y troncos, precipitación fustal (Pf), con el objetivo de determinar la precipitación que efectivamente alcanza el suelo bajo el monte (Pd + Pf) y cuantificar la intercepción generada por las copas. Debido a que la distancia entre baricentros de las microcuencas es de 5 km, se entendió necesario colocar otro pluviógrafo en la microcuenca de pastura para el registro directo de la precipitación incidente en la misma.

El contenido de agua en el suelo ( $\Delta H$ ) fue obtenido mediante la metodología basada en la termalización de neutrones, la cual consiste en la toma de registros de contenido de agua en el suelo mediante una sonda de neutrones (marca CPN, modelo 503DR HYDROPROBE con fuente de neutrones de 1.85 GBq (50 mCi) Americio-241: Berilio), las medidas fueron realizadas para las profundidades de: 15, 30, 50, 70, 90 y 110 cm. La variabilidad en el espesor de los suelos determinó que la profundidad hasta la cual se toman registro varía de 0.5 m a 1.1 m, éstos fueron obtenidos una vez al mes durante el período de evaluación. A partir del mapa de suelo realizado para ambas microcuencas, se seleccionaron los 3 suelos más relevantes en cuanto a área, para el estudio de la evolución en el contenido de agua de los mismos bajo diferente cobertura (Tabla 3)

**Tabla 3.- Suelos característicos de las microcuencas y el área (%) ocupada por los mismos**

<b>Suelos</b>	<b>Microcuenca Pastura (% área)</b>	<b>Microcuenca Forestal (% área)</b>
Argisoles Dístico	29	30
Brunos. Subéut./Vertisoles	31	20
Brunos. Subéut. Típicos	32	39
<b>Total del área (%)</b>	<b>92</b>	<b>89</b>

En la microcuenca forestada se seleccionaron 7 sitios representativos, distribuidos en toda el área, para evaluar el contenido de agua en el suelo. Los tubos de acceso a la sonda de neutrones se instalaron, en cada uno de los sitios, en la fila y en la entrefila, lo que determinó un total de 14 tubos. En la microcuenca de pastura se seleccionaron 7 sitios de muestreo, en los que se instalaron los correspondientes tubos. Debido a que los perfiles de los diferentes suelos tienen profundidades variables, las medidas de contenido de agua se realizaron hasta una profundidad en el perfil de 80 cm, para cada uno de los suelos.

Previo a la estimación de los contenidos de agua se realizó la calibración de la sonda para cada uno de los suelos. La misma se obtuvo a partir de muestreos de suelos a diferentes contenidos de humedad, determinándose el contenido de agua mediante el método gravimétrico, obteniéndose correlaciones entre éstos valores y los obtenidos por termalización de neutrones. Las ecuaciones obtenidas se utilizan posteriormente para estimar el contenido de agua volumétrico a distintas profundidades de suelo.

El escurrimiento superficial fue medido en vertederos instalados en los puntos de cierre de ambas microcuencas. Los mismos se construyeron de cresta delgada, triangulares (abertura de 100°), estableciéndose para su diseño que el caudal máximo de funcionamiento se correspondiera con eventos extremos aproximadamente a 1 año de período de retorno, logrando así medir con muy buena confiabilidad un gran porcentaje de valores de caudal a lo largo del año. Para el registros de los eventos que superen la capacidad máxima de las estructuras de aforo instaladas, se estimó una curva de descarga altura-caudal en base a la modelación hidrodinámica de ambos cauces, por lo cual se instaló un segundo vertedero aguas arriba del cierre de cada microcuenca. El registro de caudales fue continuo, cada 5 minutos, colocándose en cada uno de los vertederos limnigrafos de boya, Marca OTT Talhimides.

La cantidad de agua percolada o sea la cantidad de agua que se “pierde” por debajo de la profundidad radicular y por tanto no queda disponible para la cubierta vegetal se evaluó mediante los registros en 6 piezómetros de 5 m de profundidad (3 en cada microcuenca). No obstante, las lecturas de niveles fueron mensuales durante el período que se analiza en el presente trabajo, por lo cual al no contar con un registro continuo de las variaciones, no fue posible estimar la percolación mensual, cuyo monto quedó incluído en el término de evapotranspiración al aplicar la ecuación de balance hídrico.

### **c) Determinación de ETr**

La ETr se determinó, mediante la aplicación de la ecuación [1], para períodos de tiempo comprendidos entre dos medidas sucesivas de agua en el suelo, aproximadamente mensuales. Luego, los valores de ETr obtenidos se acumularon para períodos aproximadamente trimestrales, pudiendo alcanzar un período mayor en aquellos casos en que se extendió el período entre dos medidas sucesivas de agua en el suelo. Los datos corresponden al período comprendido entre octubre de 2006 y setiembre de 2009.

En la microcuenca forestada se consideró la Pt como entrada de agua al sistema forestal con el objetivo de incluir en la ETr el monto interceptado por el follaje, por considerar a éste como un factor determinante en la variación del consumo de agua entre las coberturas vegetales analizadas.

Como el balance hídrico se determinó considerando solo al área afectada por la plantación (55% del total de la microcuenca), el escurrimiento superficial se corrigió descontándole la fracción correspondiente al escurrimiento generado por el área de pastura (45% del área total de la microcuenca). Para determinar el monto a descontar se calcularon los coeficientes de escorrentía de la pastura, en base a los datos de la microcuenca de pastura, el cual fue a su vez corregido a través

de un coeficiente teniendo en cuenta las diferencias de pendiente entre ambas microcuencas, 5.9% en la pastura y 4.7% en la forestal. Luego de obtenidos los coeficientes para cada período se determinó el escurrimiento proveniente del área de la microcuenca que está bajo pastura, el escurrimiento restante se asumió que era generado por el área forestada. A partir de balances mensuales se determinó la ETr, estacional y anual para una cubierta forestal.

El contenido de agua estimado para cada unidad de suelo se ponderó por el área correspondiente a cada una, determinándose el monto correspondiente al contenido de agua en el suelo total para cada una de las microcuencas.

La percolación (Perc) durante el período analizado no fue medida en forma continua por lo cual no se consideró al momento de realizar los balances, asumiéndose su inclusión dentro del término de ETr estimado.

De acuerdo a lo anterior, la ETr fue determinada por la siguiente ecuación:

$$ETr = Pt - Q \pm \Delta H \quad [1]$$

Donde:

ETr = evapotranspiración (mm)

Pt = precipitación total incidente (mm)

Q = escurrimiento superficial (mm)

$\Delta H$  = variación del agua en el suelo (mm)

Para el balance de la microcuenca cubierta por pasturas se contó con registros de precipitación, contenido de agua en el suelo hasta los 80 cm de profundidad en 7 sitios y escurrimiento superficial medido en el punto de cierre de la microcuenca. En éste caso, el escurrimiento superficial fue corregido descontándole una fracción correspondiente al escurrimiento base, consecuencia de que ésta microcuenca presenta flujo de agua permanente, aún en épocas de sequía. Para los períodos de tiempo entre los cuales se realizó cada balance se estimó gráficamente el aporte correspondiente al flujo base, el cual se descontó al escurrimiento total con el objetivo de no subestimar el valor de ETr. Al igual que en la microcuenca forestada, la percolación no fue considerada. La ETr se obtuvo como término residual mediante la aplicación de la ecuación [1].

A partir de los registros obtenidos en cada una de las microcuencas, se procedió a calcular la ETr mediante balances hídricos para cada uno de los períodos considerados. Posteriormente los montos de ETr estimados se acumularon a nivel estacional y anual con el objetivo de obtener los correspondientes valores de Etr para una cubierta de pastura natural, con un manejo ganadero tradicional.

Con la información obtenida, se relacionó la precipitación acumulada a nivel trimestral con la cantidad de agua consumida (ETr) en igual período, para ambas coberturas (pastura y forestación). Asumiendo que la ETr de una cubierta vegetal en una microcuenca está controlada por la disponibilidad de agua (cantidad de precipitación) y la demanda atmosférica (máximo consumo de agua que puede ser realizado por la vegetación), con las correlaciones obtenidas se generó un modelo (Modelo Simple) a partir del cual estimar la ETr trimestral, a nivel de microcuenca o parcela, conociendo los valores de precipitación para igual período y la proporción del área afectada a cada cobertura.

## RESULTADOS

En las Tablas 4 y 5 se muestran los distintos términos del balance hídrico determinados para períodos de tiempo aproximadamente trimestral, a partir de registros mensuales obtenidos durante el período octubre de 2006 – setiembre 2009. Los valores de ETr son el resultado de aplicar la ecuación [1] en ambas microcuencas, forestal y pastura respectivamente.

**Tabla 4.-** Componentes del balance hídrico trimestral en la microcuenca forestal

<b>Períodos</b>	<b>Días</b>	<b>Pt (mm)</b>	<b>Q corregido (mm)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b>ETr (mm)</b>
<i>Puntos de ajuste:</i>					
Oct 06 – Ene 07	126	637	46	46	<b>545</b>
Feb 07 – May 07	108	685	131	57	<b>497</b>
Jun 07 – Ago 07	90	91	55	-49	<b>85</b>
Set 07 – Nov 07	89	367	55	5	<b>307</b>
Dic 07 – Feb 08	100	235	0	-13	<b>248</b>
Mar 08 – May 08	107	255	0	6	<b>248</b>
Jun 08 – Ago 08	88	201	0	18	<b>183</b>
<i>Puntos de verificación:</i>					
Set 08 – Nov 08	94	137	0	-31	<b>168</b>
Dic 08 – Mar 09	104	397	0	26	<b>370</b>
Abr 09 – Jun 09	84	93	0	-19	<b>112</b>
Jul 09 – Set 09	82	188	0	14	<b>154</b>

**Tabla 5.-** Componentes del balance hídrico trimestral en la microcuenca de pastura

<b>Períodos</b>	<b>Días</b>	<b>Pt (mm)</b>	<b>Q corregido (mm)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b>ETr (mm)</b>
<i>Puntos de ajuste:</i>					
Oct 06 – Ene 07	126	643	53	15	<b>576</b>
Feb 07 – May 07	108	659	199	66	<b>394</b>
Jun 07 – Ago 07	90	74	13	-4	<b>65</b>
Set 07 – Nov 07	89	371	108	-34	<b>297</b>
Dic 07 – Feb 08	100	232	8	-51	<b>275</b>
Mar 08 – May 08	107	249	10	31	<b>208</b>
Jun 08 – Ago 08	88	211	41	49	<b>121</b>
<i>Puntos de verificación:</i>					
Set 08 – Nov 08	94	184	25	-67	<b>226</b>
Dic 08 – Mar 09	104	389	54	58	<b>277</b>
Abr 09 – Jun 09	84	93	6	-14	<b>101</b>
Jul 09 – Set 09	82	164	18	20	<b>126</b>

Se puede apreciar que para los años evaluados las precipitaciones presentaron anomalías en cuanto a su distribución. En los dos primeros períodos de evaluación, de unos 4 meses de duración, la precipitación fue aproximadamente el 50% de la precipitación media anual (1200 mm) en cada uno de ellos. A su vez, de los 3 años evaluados, en el primero la cantidad de precipitación estuvo por encima de la media (1507 mm), el segundo aproximadamente la media (1091 mm) y el último muy por debajo (817 mm). Los valores anuales mencionados se corresponden con los registros en la microcuenca forestada.



Con la información disponible para 11 períodos, correspondientes a los balances calculados según la ecuación [1], se obtuvo la correlación entre la Pt y la ETr para los dos tipos de vegetación existentes: pasturas y plantación de *Eucalyptus* (Figura 2 y 3).

A partir de las relaciones obtenidas se desarrollo el Modelo Simple (Ecuación 2), 7 períodos fueron utilizados en la correlación de las variables y los 4 restantes para su verificación,

$$ETr = 1.696(Pt)^{0.887} (AF) + 0.826(Pt)^{0.989} (AP) \quad [2]$$

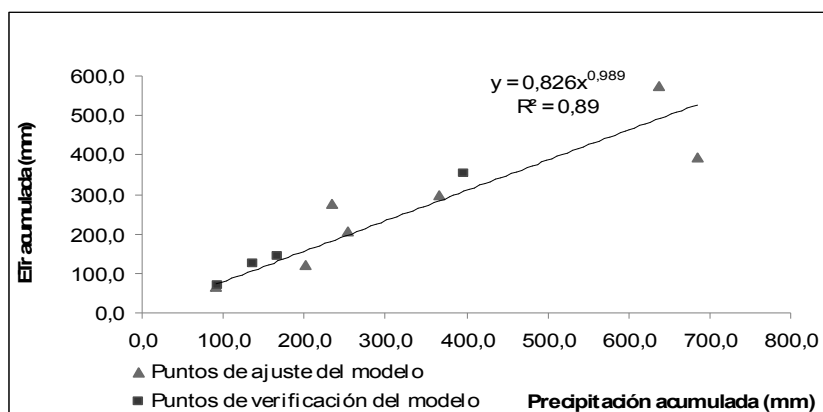
donde:

ETr: evapotranspiración real trimestral (mm)

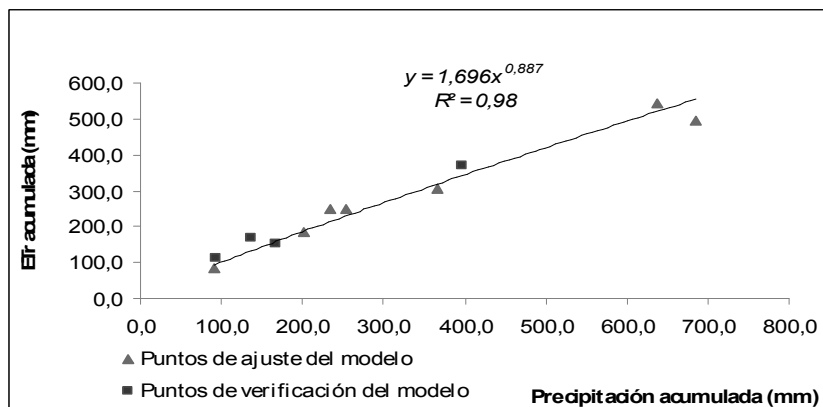
Pt: precipitación total trimestral (mm)

AF: proporción del área afectada por forestación

AP: proporción del área afectada por pastura



**Figura 2.-** Relación entre la precipitación y la evapotranspiración real a escala trimestral para la cobertura de pastura



**Figura 3.-** Relación entre la precipitación y la evapotranspiración real a escala trimestral para la cobertura forestal

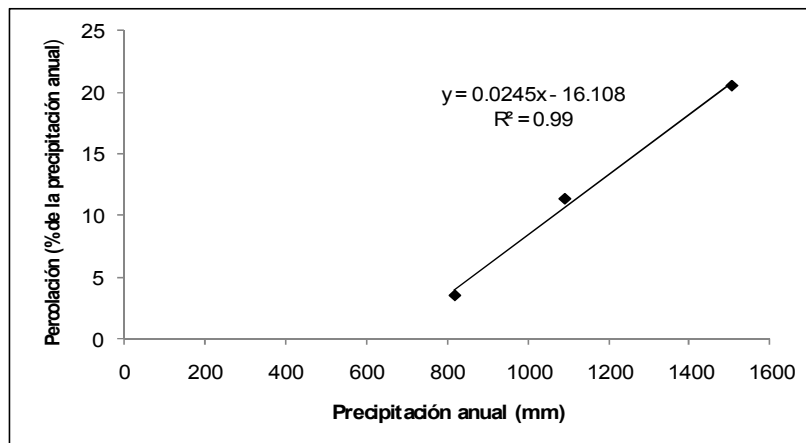
En la Tabla 6 se presenta la comparación de los valores de ETr obtenidos mediante la aplicación del modelo propuesto por Zhang et al. (2001) para una escala anual y el aquí presentado (Modelo Simple, determinado para una escala trimestral). Para determinar exactamente la ETr anual a partir del Modelo Simple, ésta se obtuvo a través de la suma de la ETr calculada para cada uno de los trimestres correspondientes a cada año. El monto de Pt considerados en las determinaciones se corresponde con los registros trimestrales acumulados en la microcuenca bajo cobertura forestal.

El modelo asume que la ETr desde un microcuenca o parcela, para el período considerado, es la suma de la ETr, para igual período, desde la vegetación herbácea y de la ETr proveniente de los árboles, con un peso lineal de acuerdo con el área afectada por cada una de las cubiertas vegetales.

**Tabla 6.-** Comparación valores de ET real estimados a partir del Modelo propuesto por Zhang y el Modelo Simple

Año	Precipitación Anual (mm)	Modelo de Zhang ETr (mm)	Modelo Simple ETr (mm)
Oct/06 - Set/07	1507	954	1264
Oct/07 - Set/08	1091	789	913
Oct/08 - Set/09	817	652	677

Al comparar los resultados aportados por ambos modelos se observa una estimación mayor del Modelo Simple con respecto a los estimados con el modelo de Zhang et al. (2001). Si ésta diferencia la relacionamos con la precipitación anual obtenemos valores que van desde un 21% para el primer año a 11% y 3.5% en el segundo y tercer año respectivamente. La diferencia encontrada entre ambos modelos estaría explicando el monto de agua percolada, término que se encuentra incorporado en el valor de ETr estimado por el Modelo Simple. La Figura 4 muestra la relación entre la precipitación anual y la percolación anual, expresada como porcentaje de la precipitación anual. La validación de la relación lineal hallada requiere contar con mayor número de años de monitoreo para su validación.



**Figura 4.-** Relación entre el porcentaje percolado en la microcuenca forestal y la precipitación anual

Para obtener resultados confiables en trabajos de investigación con las características como el que aquí se presenta se necesita una serie de datos que abarque un mayor número de años. Por lo tanto, estos resultados deben ser considerados como preliminares. Dado que, a nivel nacional existe escasa información sobre el consumo de agua de las plantaciones forestales, consideramos que los resultados presentados, aunque preliminares, son relevantes y constituyen el punto de partida para futuras investigaciones en éste ámbito.

## CONCLUSIONES

En base a datos de dos microcuencas con diferentes usos (forestal y pasturas) se propuso un modelo simple, con base en el balance hídrico, para determinar la ETr de una cuenca o parcela cuando se efectúan cambios en el uso del suelo, de pasturas a forestación o viceversa. Los resultados muestran que, a pesar de haber sido evaluados años atípicos en cuanto a cantidad y distribución de las precipitaciones, presenta una buena confiabilidad en ambas coberturas, considerándose una

herramienta útil al evaluar la variación del consumo de agua a nivel estacional frente a un cambio, total o parcial, en la cobertura vegetal.

La comparación con el modelo propuesto por Zhang resulta en una sobre estimación en los valores de Etr estimados por el modelo aquí propuesto, la diferencia corresponde en promedio, para los tres años analizados, a un 11.6% de la precipitación anual. Consideramos que éste monto se relaciona con la magnitud de la percolación, término que se encuentra incorporado en los valores estimados de ETr.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bosch, J.M.; Hewlett, J.D.** (1982) "A review of catchments experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration" *Journal of Hydrology*, 55, 3-23.
- Brown, A.; Zhang, L.; McMahon, T.; Western, A.; Vertessy, R.** (2005) "A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation" *Journal of Hydrology*, 310, 28-61.
- Calder, I.R.** (1992) "The hydrological impact of land-use change" *Proceedings of the Conference on Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineer Advisers Conference*, Southampton, July 1992, pp. 91-101
- Holmes, J.W.; Sinclair, J.A.** (1986) "Water yield from some afforested catchments in Victoria" Paper presented at *Hydrology and Water Resources Symposium*, Inst. of Eng., Brisbane, Queensland, Australia, Nov. 25-27, 1986
- Johnson, E.; Kovner, J.** (1956) "Effect on streamflow of cutting a forest understory" *Forest Science*, (2) 82-91
- Lu, J.; Sun, G.; MacNulty, S.; Amatya, D.** (2003) "Modeling actual Evapotranspiration from forested watersheds across the southeastern United States". *Journal of the American Water Resources Association*, 39(4) 887-896
- 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
- Soares, J.V.; Almeida, A.C.** (2001) "Modelling de water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brasil" *Journal of Hydrology*, 253, 130-147.
- Zhang, L.; Dawes, W.R.; Walter, G.R.** (1999) "Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance". *Technical Report 99/12*, Cooperative Research. Center For Catchment Hydrology, Canberra, ACT, 1999
- Zhang, L.; Dawes, W.R.; Walter, G.R.** (2001) "Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at escale catchment". *Water Resources Research* 37(3): 701-708