



Estimación de la disponibilidad hídrica en microcuencas forestadas con *Eucalyptus*.

Jimena Alonso, Luis Silveira

*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería,
Universidad de la República. jalonso@fing.edu.uy*

RESUMEN: Para la determinación de la escorrentía mensual en cuencas no aforadas de Uruguay, la herramienta utilizada es el modelo precipitación - escurrimiento de Témez (1977), que ha sido calibrado y regionalizado a partir de información local de 12 cuencas. La sustitución de campo natural para uso ganadero por plantaciones forestales genera aumento en la evapotranspiración y reducción de la escorrentía en la cuenca, debido en gran parte a la intercepción que ocurre en el dosel forestal. Se muestra en este trabajo que es posible ajustar satisfactoriamente dicho modelo mensual de escorrentía, para que continúe siendo útil a los efectos de la gestión del recurso hídrico en cuencas forestadas, acoplándolo a un modelo de intercepción de la precipitación calibrado en función de información monitoreada en microcuencas experimentales.

PALABRAS CLAVE: balance hídrico, forestación, intercepción de precipitación, gestión de recursos hídricos.

1 INTRODUCCIÓN

Conocer la disponibilidad del recurso hídrico es uno de los factores clave para su gestión y en particular para el otorgamiento de permisos de uso, tanto de aguas superficiales como subterráneas. En Uruguay quienes requieran estos permisos, deben tramitar su habilitación ante la Dirección Nacional de Aguas del Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (DINAGUA-MVOTMA). Con el objetivo de guiar técnicamente dichas solicitudes, los técnicos habilitados en Uruguay disponen del “Manual de diseño y construcción de pequeñas presas” desarrollado por DINAGUA y el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA – FING-Udelar) [1]. Dicho Manual recomienda la aplicación del modelo de escurrimiento mensual de Témez [2] para el cálculo del balance hídrico en la cuenca de aporte a los embalses, cuando éstas no son aforadas o cuentan con un registro de información insuficiente. El modelo ha sido calibrado a partir de 12 cuencas aforadas por la DINAGUA, regionalizando sus parámetros, para poder disponer de una relación precipitación escurrimiento en cualquier cuenca del país [1].

En términos de escala media anual, la evapotranspiración es el principal proceso hidrológico que explica la modificación del caudal específico como resultado del cambio de uso de los suelos [3 y 4]. En particular, existe clara coincidencia en señalar que la forestación de campo natural reduce el escurrimiento superficial [5, 6], y se ha encontrado que en términos de balance hídrico anual esta reducción se relaciona directamente con el aumento de la evapotranspiración que genera la intercepción del dosel forestal [7]. Se presentan en este trabajo, alternativas para incorporar al modelo de Témez que se presenta en [1], el cálculo de los procesos hidrológicos asociados a la cobertura forestal que inciden sobre la escorrentía superficial.

2 AREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN

La información de base se monitorea en un par de microcuencas experimentales de 100-200 ha de superficie: Don Tomas (DT) y La Cantera (LC) ubicadas en la zona litoral oeste de Uruguay. Las microcuencas están situadas sobre cañadas afluentes del Arroyo Capilla Vieja en su margen izquierda, que es a su vez afluente del Río Queguay (Figura 1).

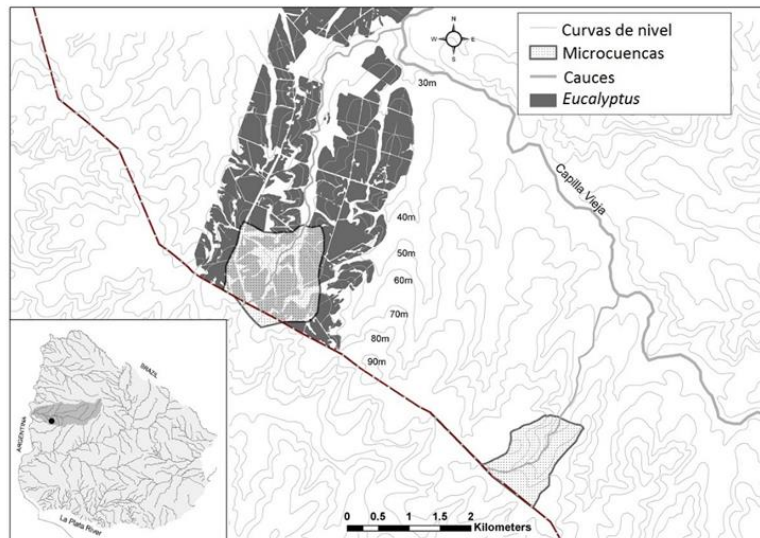


Figura 1. Localización de las microcuencas experimentales DT y LC.

La vegetación de la microcuenca LC es de parque de algarrobos (*Prosopis* sp) con gramíneas de ciclo invernal, mientras que en DT existe una plantación adulta de *Eucalyptus* del tipo *globulus* ssp. *Maidenni*, 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 ya que serán utilizadas como elementos de comparación frente a diferente cobertura vegetal del suelo. Las variables hidrológicas medidas son precipitación incidente, variables meteorológicas, caudal, redistribución de lluvias, contenido de humedad del suelo y niveles freáticos. El balance hídrico estacional y anual se calculó en DT y LC desde octubre de 2006 a diciembre de 2014, para evaluar los cambios en los procesos hidrológicos. Luego de esa fecha la cuenca forestal fue cosechada, dando lugar a otra situación de evaluación que no se considera en este trabajo, si bien el monitoreo continúa actualmente.



3 METODOLOGÍA

3.1 *Modelo de Témez.*

El modelo de Témez [2] es un modelo de balance hídrico agregado, que permite estimar el escurrimiento mensual generado en una cuenca a partir de la precipitación, el almacenamiento en el suelo y la evapotranspiración potencial. Reproduce el ciclo hidrológico de forma continua en el tiempo de una manera simple y conceptual. El modelo considera dos capas de suelo, una superior no saturada, y una inferior saturada. Estas dos capas pueden ser consideradas como reservorios, generadoras de un flujo superficial rápido y lento respectivamente. Una parte excedente (T) del agua que precipita (P), es drenada y sale por el cauce, mientras que el resto de esta agua (P-T) es almacenada en la primer capa de suelo. En esta capa del suelo se genera la evapotranspiración. El modelo permite además almacenar agua que pase de un mes a otro. El esquema general de cálculo así como un mayor detalle de la estructura del modelo y su calibración en Uruguay se presenta en “Manual de Diseño y Construcción de Pequeñas Presas” [1]. Para la implementación del método en cualquier cuenca de nuestro país, es necesario conocer el valor de los cuatro parámetros del modelo: CAD, CP0, I_{max} y α . A nivel nacional está validada una calibración regional consistente en determinar un único valor para cada uno de los parámetros válido para cualquier punto del país, en base a regionalizar el parámetro CAD vinculándolo al valor de Agua Disponible del suelo [8]. Como hipótesis estos valores regionales serían válidos para simular series de escurrimiento de aquellas microcuencas bajo cobertura de campo natural, ya que ésta fue la condición de calibración y regionalización original (situación previa al año 2000).

3.2 Modelo de Gash

Para la simulación de la intercepción se utilizó el modelo de Gash cuyo marco conceptual del modelo está esquematizado en [9]. Considera al dosel y los fustes como reservorios que son llenados por la precipitación y vaciados por la evaporación y el drenaje y estima las tasas de entrada y salida de esos compartimientos. La estructura del dosel se describe mediante el coeficiente de atravesamiento libre (pd) y la capacidad máxima de almacenamiento (S) mientras que para los fustes se considera el coeficiente de redistribución fustal (pf) y la capacidad máxima de almacenamiento de los fustes (Sf). Las distintas componentes de la intercepción se calculan a partir de la precipitación diaria asumiendo un único evento por día [9], los parámetros estructurales del dosel se ajustan en función de las relaciones entre las distintas componentes medidas de la redistribución de la precipitación: total incidente, precipitación directa y escurrimiento fustal. Finalmente se estiman las tasas medias de evaporación y precipitación horarias, que gobiernan el llenado y vaciado de los reservorios, en base a la información meteorológica monitoreada con alta frecuencia en las microcuencas experimentales.

3.3 Modelo de Zhang

Es un modelo simple para cuantificar el impacto de los cambios en la cobertura vegetal en la evapotranspiración media anual (ET) a escala de cuencas, basado en datos y parámetros fácilmente obtenibles a escala regional [3]. En el mismo se asume que la ET en una cuenca es la suma de la ET de la vegetación herbácea y la ET de la cobertura forestal, afectando en forma lineal de acuerdo a las respectivas áreas. Los parámetros del modelo, E_o (evapotranspiración potencial) y w (coeficiente de disponibilidad de agua en el suelo) se consideran constantes para cada una de las coberturas, surgen del análisis de un gran número de estudios de balance hídrico en cuencas con diferentes coberturas y con distinto porcentaje del área afectada por pasturas y forestación, así como también afectadas por diferentes situaciones climáticas y tipos de suelos. La aplicación del mismo para determinar la evapotranspiración media anual a situaciones con ambas coberturas toma la forma de la ecuación (1).

$$ET = \left(f \frac{1 + 2 \frac{1410}{P}}{1 + 2 \frac{1410}{P} + \frac{P}{1410}} + (1 - f) \frac{1 + 0.5 \frac{1100}{P}}{1 + 0.5 \frac{1100}{P} + \frac{P}{1100}} \right) P. \quad (1)$$

Donde ET es la evapotranspiración media anual (mm), P es la precipitación anual (mm), E_o es la evapotranspiración potencial (mm), f es la proporción del área bajo cobertura forestal y w es el coeficiente de disponibilidad de agua en el suelo y representa las diferencias en como las distintas coberturas utilizan el agua del suelo. La relación anterior sugiere que la evapotranspiración media anual bajo las mismas condiciones climáticas está determinada, principalmente, por las características de la vegetación y las diferencias podrían ser atribuidas a la forma en que los distintos tipos de vegetación hacen uso del agua del suelo.

3.4 Modelo acoplado

Se propone implementar entonces para cuencas forestadas el modelo de Témez en forma ponderada, asumiendo que la escorrentía en una cuenca es la suma de la escorrentía proveniente de la zona de campo natural y la escorrentía de la zona forestada, afectando en forma lineal cada componente de acuerdo a las respectivas áreas de uso de suelo. La simulación de escorrentía mantiene la forma original del modelo de Témez para la primer fracción, mientras que para la zona bajo forestación se consideran dos alternativas para modelar la reducción de escorrentía producto de la cobertura forestal:

- a) en la zona forestada la precipitación que alcanza el suelo es la precipitación neta, es decir descontando la intercepción del dosel, estimada por el modelo de Gash. Esa precipitación es la variable de entrada al modelo de Témez en zona forestada.
- b) la evapotranspiración de la zona forestada (ET_f) como la resultante del modelo de Zhang, se toma como variable de entrada al modelo de Témez en zona forestada, mientras que la precipitación incidente se mantiene sin afectar.

La hipótesis b) presenta por su lado la ventaja de la mayor simplicidad del modelo de Zhang, frente al modelo de Gash, para su aplicación. Ambas hipótesis resultan adecuadas en el caso de la cuenca de Don Tomás ya que se trata de un monte con dosel completamente desarrollado.

4 RESULTADOS

Se consideró que los valores regionales del modelo de Téméz son válidos para simular series de escurrimiento de la microcuenca bajo cobertura de campo natural, ya que ésta fue la condición de calibración y regionalización original. Realizando la simulación, durante el período enero-2007 a diciembre-2014, en la cuenca LC se obtienen los indicadores de la Tabla 1. Si bien el ajuste se valora como adecuado, se procede a una calibración local de los parámetros con el objetivo de ajustar el modelo con mejor comportamiento y analizar la variación de los parámetros dada por la cobertura forestal. Los ajustes logrados y los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ajuste del modelo Temez

Microcuenca	Ajuste			Parámetros			
	R ²	Nash	Dif. Vol(%)	CAD	CP0	lmax(mm)	α (1/mes)
La Cantera (regionales)	0.92	0.77	8.1	0.92	0.30	386	2.325
La Cantera (locales)	0.91	0.78	-0.4	0.36	0.30	1400	2.325

Se entiende que la calibración local no mejora significativamente el ajuste de la simulación, por lo cual se mantienen los parámetros regionales para la implementación del modelo en la microcuenca forestada. En la Tabla 2 se presentan los indicadores de ajustes de los períodos de validación (enero-2007 a diciembre-2014) para la cuenca forestada y en la Figura 2 la representación de los datos observados y ambas simulaciones para la microcuenca forestada.

Tabla 2 Ajuste del modelo Temez y sus adaptaciones a la microcuenca forestada

Modelo	R ²	Nash	Diferencia de volumen (%)
Temez original	0.73	0.53	-28.3
Temez & Gash	0.85	0.69	-5.6
Temez & Zhang	0.85	0.50	-36.9

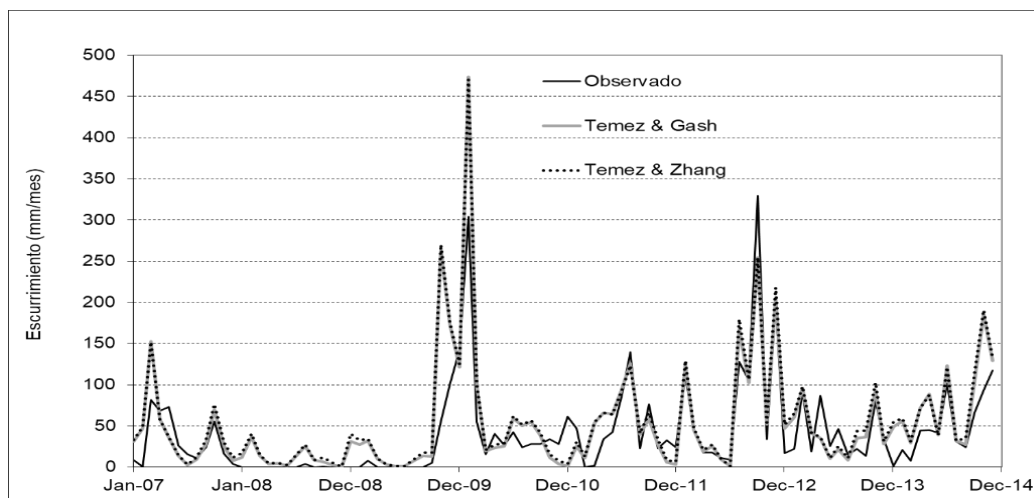


Figura 2. Ajuste del modelo de Téméz en la microcuenca DT.

5 CONCLUSIONES

Es posible ajustar satisfactoriamente un modelo mensual, que resulte útil a los efectos de la gestión del recurso hídrico, en base a los modelos de Temez y Gash, según indican los resultados de las simulaciones en la microcuenca forestada, donde la variante a) del modelo tiene un desempeño ampliamente superior a la variante b). Dicho modelo acoplado representa con un buen ajuste los volúmenes escurridos a nivel mensual en base a la precipitación incidente en la cuenca, el ciclo medio de evapotranspiración potencial para la zona y la modelación de intercepción.

Para ésta última componente es necesario conocer los parámetros estructurales del dosel forestal, y las tasas medias de evaporación y precipitación horarias, en base a la información meteorológica monitoreada con alta frecuencia. Esta sin duda es una limitante para su aplicación en otros sitios, donde las características estructurales del dosel difieran de las estimadas en esta implementación, es decir, otras especies, otras densidades de plantación, montes de rebrote o incluso monte nativo. La investigación pretende seguir ahondando en tres ejes: i) relacionar los parámetros del modelo de intercepción a parámetros más fácilmente medibles, como el índice de área foliar; ii) independizar el modelo de parámetros dependientes del monitoreo de variables meteorológicas en alta frecuencia y iii) validar el modelo acoplado en cuencas de mayor superficie ($>1000 \text{ km}^2$).

6 AGRADECIMIENTOS

El programa de monitoreo en microcuencas que se lleva a cabo desde 2006, ha obtenido financiación del Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y las empresas forestales Montes del Plata y UPM Forestal Oriental. Los autores agradecen a las autoridades y funcionarios de las instituciones mencionadas por su apoyo y colaboración

7 REFERENCIAS

- [1] DINAGUA, IMFIA, (2011) Manual de diseño y construcción de pequeñas presas
- [2] Temez J.R., (1977) “Modelo matemático de transferencia precipitación aportación”. ASINEL.
- [3] Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology CSIRO Land and Water. Technical report 99/12, November, 1999
- [4] Zhang L, Dawes WR and Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3): 701-708.
- [5] Calder, I.R. (2005). *The Blue Revolution: Integrated Land and Water Resource Management*. Earthscan Publications, Londres. Segunda Edición.
- [6] Silveira, L; Alonso, J. 2009. Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay. *Hydrological Processes* 23, 320–329.
- [7] Silveira, L.; Gamazo, P.; Alonso, J.; Martínez, L. 2016. Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay. *Hydrol. Process.*, doi: 10.1002/hyp.10952.
- [8] Molfino J.H., Califra A. (2001) “Agua Disponible de las Tierras del Uruguay”, División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.
- [9] Gash, J.H.C., Lloyd, C.R., Lachaud, G. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170:79-86.