

## **Sensibilidad de ecuaciones de Evapotranspiración en la estimación de los consumos de agua de *Eucalyptus dunnii*.**

**Rébori, Maria Graciela.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> investigadora del Instituto Nacional de tecnología agropecuaria – INTA  
grebori@cnia.inta.gov.ar

**Abstract:** A correct election of potential evapotranspiration (PET) equation is critical for water balance estimation of forest. The objective of this work was analyze the PET equations of SIMGRO model (SIMulation of GROundwater). SIMGRO model solves water balance in the unsaturated zone and the acuifer of diverse landuse covers, forest inclusively. The water consumption of the *Eucalyptus dunnii* was measured in a commercial forest. The weather data was measured daily and the humidity contents were measured up to 2 ms of depth monthly. The experimental sites were two: 1) old mounts, 8 years old and 2) young mounts ,2 years old. The PET equations of Makkink, Priestley- Taylor and Penman-Monteith were compared and ordered in increasing of meteorological data. requirments. The comparison of eucalyptus water consumptions with all .estimated data by the equations, were very significant in adult and young state.

**Palabras claves:** evapotranspiración, requerimientos hídricos, balance de agua; *Eucalyptus dunnii*; SIMGRO.

**Resumen.** Una correcta elección de la fórmula de evapotranspiración potencial (ETP) es crítica para la estimación del balance de agua de las plantaciones forestales. Este trabajo tuvo como objetivo analizar las ecuaciones de ETP del modelo de simulación hidrológica SIMGRO (SIMulation of GROundwater flow and surface water levels). El modelo SIMGRO resuelve el balance hidrológico en la zona no saturada y en el acuífero de diversas coberturas vegetales, inclusive forestaciones.

Entre 1999 y 2001 se midió el consumo de agua del *Eucalyptus dunnii* en una forestación comercial de Oliveros, Santa Fe, Argentina. Se midieron los datos meteorológicos con frecuencia diaria y los contenidos de humedad hasta 2 m de profundidad una vez al mes. Los sitios experimentales fueron dos: 1) monte adulto, de 8 años de edad y 2) monte joven de 2 años. Se probaron las ecuaciones de ETP de Makkink, de Priestley y Taylor y Penman-Monteith, ordenadas por su creciente requerimiento de datos meteorológicos. La comparación con los consumos del eucalipto en estado adulto arrojaron coeficiente de correlación (r) muy significativos (Makkink con  $r=0,93$ ; Penman-Monteith con  $r=0,92$ ; (Priestley y Taylor con  $r=0,90$ ). Los resultados fueron muy similares para el consumo del monte joven (0,94; 0,93; 0,91, respectivamente).

## 1. INTRODUCCION

La exactitud de cálculo de un balance hídrico se basa principalmente en la calidad de los datos de entrada. Para lograr precisión y coherencia de los resultados obtenidos; es conveniente efectuar un análisis de sensibilidad de los principales parámetros que utiliza el modelo de modo de representar con fidelidad los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca.

Tanto la evapotranspiración como la precipitación son los términos de mayor importancia en el balance hídrico. Ambas variables son relevantes en investigaciones hidrológicas en general, en modelos de predicción atmosférica, en proyectos de drenaje, en la agricultura de irrigación y en la clasificación de climas. Thornthwaite, 1948, describió la importancia biológica y física de la evapotranspiración en la clasificación climática.

La medida de la precipitación es sencilla y las estaciones meteorológicas cuentan con instrumental apropiado para su cuantificación.

La medida de la evapotranspiración es de vital importancia en regiones áridas y semiáridas. Resulta imprescindible para la determinación de las necesidades de agua de los cultivos y por lo tanto para el diseño y manejo de los sistemas de riego. Es evidente que la disponibilidad de agua es el factor más crítico en determinar el desarrollo y productividad de la planta. Frecuentemente es incluida como una variable más, en ecuaciones de regresión para estimar producciones de cultivo (Williams 1972). De Wit, 1958, encontró una relación analítica entre producción del cultivo y uso de agua: donde la producción total de materia seca es directamente proporcional a la transpiración total durante la estación de crecimiento. Retta y Hanks 1980 reportaron resultados similares para maíz y alfalfa.

La evapotranspiración es medida por varios procedimientos, entre ellos: 1) balance de agua en el volumen de suelo enraizado; 2) evapotranspirómetros y 3) el método del lisímetro ubicado sobre la superficie vegetada. En la práctica es preciso recurrir a su estimación porque su medida es onerosa y exige además tiempo y personal calificado para su cuantificación.

Hay diferentes métodos para estimar esta variable.. Un método común en hidrología es determinar la evapotranspiración a partir de la diferencia entre precipitación y escurrimiento sin tener en cuenta a la planta y su complejo metabolismo como elemento intrínseco del proceso de transpiración. También se usa la técnica de los sensores remotos para medir los procesos simultáneos de evaporación del suelo y transpiración de las plantas, pero aún las

estimaciones obtenidas con estos sensores tienen un grado importante de incertidumbre (Franks y Beven, 1997)

Con frecuencia para su determinación se emplean los métodos climatológicos que la estiman a partir de datos meteorológicos. La precisión y confiabilidad de estos métodos varía de unos a otros; dependiendo principalmente del tipo de clima; tal es el caso de la ecuación de Makkink, que da buenos resultados en climas húmedos y fríos, pero no en regiones áridas. (Rossenberg, 1983).

Siempre es necesaria alguna calibración local para obtener mayor precisión y confiabilidad en los valores estimados.

La estimación indirecta de la ET en base a fórmulas empíricas es de gran utilidad. El problema radica en que se aplican en zonas con características climáticas diferentes, a aquellas para las que fueron elaboradas

Los modelos hidrológicos incluyen ecuaciones simples para simular la evapotranspiración, hasta modelos mucho más complejos como la función de Penman-Monteith que requiere gran cantidad de variables para su determinación .

Hasta el momento no existe una metodología práctica para medir la evapotranspiración de los cultivos a escala de cuenca. Hay falta de mediciones directas o de estimaciones verificadas en los lugares de estudio. Los métodos para determinarla están condicionados por la disponibilidad de información necesaria.

Los modelos representan una simplificación de una realidad compleja, dependiendo el nivel de precisión del estudio de la calidad y disponibilidad de datos básicos. A mayor número de variables en el modelo, más preciso será el cálculo de la evapotranspiración, pero todos los modelos tienen sus limitaciones. Es importante usar el método adecuado a las características climáticas de la zona de estudio.

## 2. MATERIALES Y METODOS

Este estudio se efectuó dentro del marco del proyecto PIA02/97: Requerimientos de agua del *Eucaliptus dunnii*. Medición y contribución al balance hídrico regional; en convenio con SAGPyA-BIRF-INTA.

El modelo se calibró en la cuenca del río Carcarañá, en la provincia de Santa Fe, Argentina, que se origina aguas arriba por la confluencia del Río Tercero y el Arroyo Saladillo en la provincia de Córdoba y desemboca en el río Coronda en la localidad de Puerto Gaboto. A escala local, el estudio se realizó en una plantación comercial de 4.200 Ha forestada con *Eucalyptus globulus*, *E. maidenii*, *E. dunnii*, *E. tereticornis* y *E. viminalis*.

Entre 1999 y 2001 se midió el consumo de agua hasta 2 m de profundidad del *E. dunnii* en dos estadios: monte joven y monte adulto. Se determinaron las variables que intervienen en el balance hidrológico en parcelas seleccionadas para tal fin y se computaron los datos meteorológicos con frecuencia diaria.

Si bien no se desconoce la complejidad de la redistribución de la lluvia interceptada por los árboles, se calculó la fracción de lluvia interceptada por el dosel por la diferencia entre los datos de lluvia medidos en los pluviómetros ubicados fuera y dentro de la cobertura forestal.

Para estimar la evapotranspiración real del cultivo se escogieron tres métodos de predicción incluidos en el modelo SIMGRO para obtener la evapotranspiración del *E. dunnii*. El modelo de simulación hidrológica SIMGRO (**S**IMulation of **G**ROundwater flow and surface water levels). resuelve el balance hidrológico en la zona no saturada y en el acuífero de diversas coberturas vegetales, inclusive forestaciones Querner(1989).

Se evaluaron las ecuaciones de Makkink (1957); Penman modificada por Monteith (1965) y el método de Priestley y Taylor (1972). Todas utilizan datos que se obtienen en la mayor parte de los observatorios meteorológicos. Se comparó el nivel de ajuste para predecir el

consumo de agua de la especie con los resultados obtenidos del balance de agua en los dos estadios del eucalipto.(ecuación1)

$$\boxed{PP + SW - RO - D - ET = 0} \quad \text{ec. (1)}$$

donde:

PP = Precipitación y/o riego (mm)

RO = Escurrimiento (mm)

D = Percolación (mm)

SW = Cambio en el contenido de agua del suelo.(mm)

ET = Evapotranspiración. (mm)

El modelo SIMGRO estima los requerimientos máximos de los cultivos a partir de la evapotranspiración potencial y en función del nivel relativo de agua en el suelo ( $V/V_{eq}$ ), del grado de cobertura y uso agrícola de la tierra calcula la evapotranspiración real de los mismos.

El modelo calcula la evapotranspiración potencial de los cultivos usando los factores de cultivo Feddes,(1987). Para el caso del *E. dunnii* se utilizaron factores de Kc entre 0.6 y 0.9 según la estación del año.

La Evapotranspiración potencial del cultivo ( $E_{pj}$ ) es calculada con la siguiente función:

$$\boxed{E_{pj} = K_{cj}.E_o} \quad \text{ec. (2)}$$

donde:

$E_{pj}$  es el valor diario de evapotranspiración potencial del cultivo  $j$  calculada con alguna de las tres fórmulas evaluadas.

$K_{cj}$  : factor de crecimiento del cultivo

$E_o$ : evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración real es calculada como:

$$\boxed{E_{real} = \alpha E_{pc}} \quad \text{ec. (3)}$$

donde

$\alpha = f(V_w/V_{eq})$

$E_{pc}$ : evapotranspiración del cultivo (mm/día)

$V_w$ : contenido actual de agua del suelo en la zona radical (mm)

$V_{eq}$ : contenido de agua en el equilibrio (mm) del suelo en la zona de las raíces a una profundidad dada del nivel freático. Cuando éste se encuentra en superficie (suelo anegado), la  $V_{eq}$  podrá ser considerada como la humedad a saturación.

El modelo SIMGRO cuando utiliza la ecuación de Makkink requiere los siguientes datos de entrada: día juliano; año; precipitación (mm); temperatura media (°C), humedad relativa (%), y radiación global (watt/m<sup>2</sup>). Obtiene como resultado la evapotranspiración de gramíneas, día juliano; PP (mm); Etp pino (mm/día); Etp árboles de hojas caducas (mm/día) y Evaporación del suelo desnudo (mm/día);

$$ETP = R_s \cdot \left( \frac{s}{s + \lambda} \right) + 0.12 \quad \text{ec. (4)}$$

donde:

R<sub>s</sub>: radiación global

s= gradiente la curva de saturación de presión de vapor a la temperatura media medida en el bulbo húmedo del psicrómetro.

λ= constante psicrométrica

Los datos de entrada que utiliza la ecuación de Penman Monteih son: el día juliano; año; precipitación (mm); temperatura media diaria (°C); humedad relativa (%); radiación global (watt/m<sup>2</sup>) radiación neta (watt/m<sup>2</sup>) y velocidad del viento (m/seg.).

La función de Penman-Monteith estima por medio de un modelo físico la evapotranspiración mediante la combinación de un término de radiación y de un término aerodinámico.

$$E_{Tr} = \frac{\Delta / (\Delta + \gamma^*) \cdot (1 / \lambda_v \cdot \{R_n - G\}) + \gamma (\Delta + \gamma^*) \cdot (900 \cdot U_2 / \{t_m + 273\}) \cdot (e^o - e)}{e} \quad \text{ec.(5)}$$

donde:

E<sub>Tr</sub> = evapotranspiración en mm/día

λ<sub>v</sub> = calor de vaporización del vapor de agua MJ/kg

Δ = pendiente de la curva de saturación de vapor kPa/°C

γ = constante psicrométrica kPa/°C

γ\* = constante psicrométrica modificada kPa/°C

R<sub>n</sub> = radiación neta MJ × m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>

G = flujo de calor en el suelo MJ × m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>

t<sub>m</sub> = temperatura media °C

U<sub>2</sub> = velocidad del viento a 2 metros, m/s

(e<sup>o</sup> - e) = déficit de presión de vapor, kPa

e : emisividad neta estimada como función de la humedad del aire.

El modelo de Priestley y Taylor, muestra que en ausencia de advección, la Etp está directamente relacionada con la evaporación de equilibrio, Eteq, la cual está definida por Slatyer y Mc Ilroy (1961) como la tasa mínima de evaporación de una superficie húmeda y depende solamente de la temperatura y de la energía disponible.

La ecuación de Priestley y Taylor, utiliza como datos de entrada el día juliano; año, precipitación (mm), temperatura media (°C), humedad relativa del aire (%) y radiación neta (Watt/m<sup>2</sup>). Los datos de salida son: evapotranspiración potencial, Etp, Etp pino (mm) Etp árboles de hojas caducas (mm); y Evaporación de suelo desnudo, (mm)

$$ETP = \alpha \frac{s}{(s + \gamma)} (Rn + S) \quad \text{ec. (6)}$$

donde:

$\alpha$  = relación Etp/Eteq; constante empírica que varía entre 1,08 y 1,34 o bien su media de 1,26

Rn : radiación neta

s: gradiente de la curva de presión de saturación de vapor para la temperatura media del aire medida en el bulbo húmedo

$\gamma$  constante psicrométrica que depende de la presión atmosférica y del calor específico del aire

S. flujo de calor en el suelo

### 3. Discusión de los resultados

Las tres fórmulas tienen un alto grado de ajuste, utilizando coeficientes de cultivo para eucalipto entre 0.6 y 0.9,. En este caso la ecuación de Makkink fue la que dio mejor coeficiente de correlación pero no se hallaron diferencias significativas entre los tres métodos. La comparación con los consumos del eucalipto en estado adulto arrojó coeficientes de correlación (r) muy significativos (Makkink con r=0,93; Penman-Monteith con r=0,92; Priestley y Taylor con r=0,90). Los resultados fueron muy similares para el consumo del monte joven (0,94; 0,93; 0,91, respectivamente).

La ecuación de Makkink ha sido probada con buenos resultados para predecir la evapotranspiración en climas fríos y húmedos pero no se ha encontrado resultados satisfactorios en regiones áridas.(Rosenberg, 1983). En este caso de estudio, el clima fue templado, húmedo con un año muy seco (1999) y un año más lluvioso (2000)..

Sin embargo en un anterior estudio de simulación con el modelo SIMGRO, la función que obtuvo mejor bondad de ajuste fue la ecuación de Penman Monteith con un coeficiente de cultivo kc para eucaliptos entre 0.86 y 1, obteniéndose un coeficiente de determinación r<sup>2</sup> de 0.86% (Rébori y Díaz, 2004)

La ecuación de Penman modificada por Monteith ha sido utilizado satisfactoriamente para estimar la evapotranspiración de los cultivos Slabbers,(1977) y en forestación Calder,(1977).

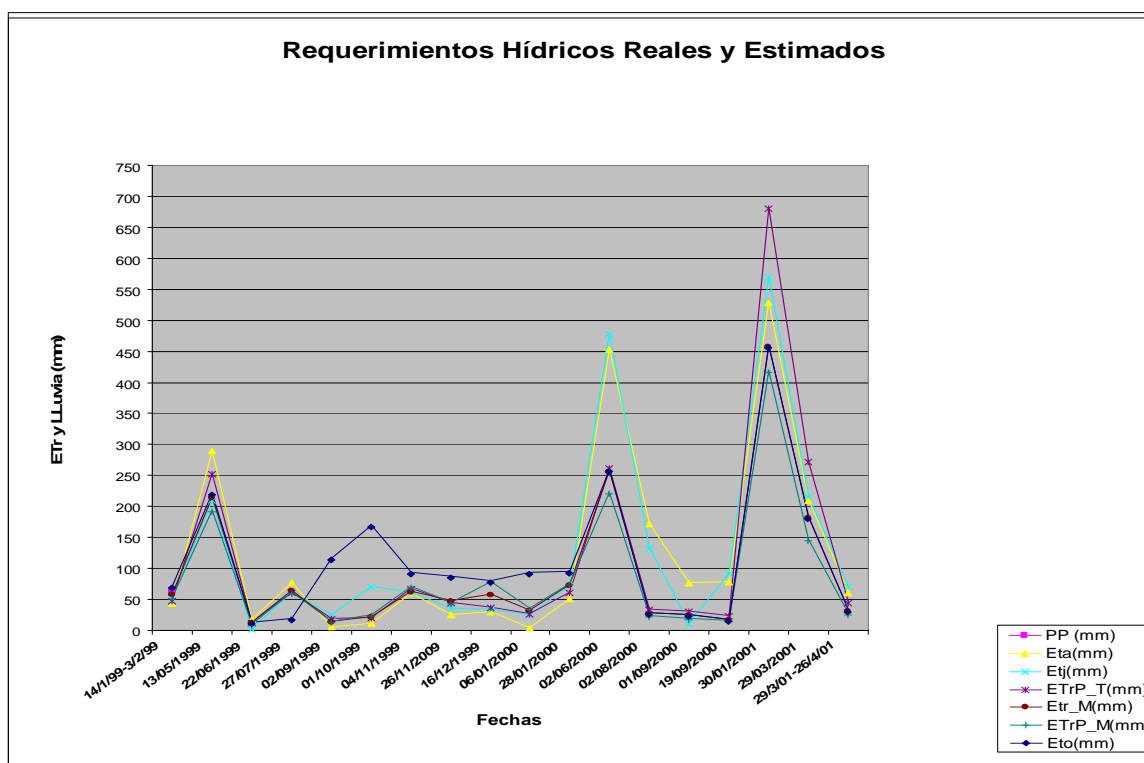
En general el método de Penman-Monteith proporciona ajustada estimación de la evapotranspiración potencial. tanto en climas áridos como húmedos Expertos de la FAO Smith (1991) concluyeron que es recomendable usar este método por ser el más eficaz para estimar la ETo.

-Las ecuaciones de estimación de evapotranspiración real del eucalipto correlacionaron mejor con la evapotranspiración potencial obteniéndose altos coeficientes de correlación (0.91 Priestley); (0.86 tanto para Makkink como para Penman Monteith) que con las lluvias (0.82 Priestley – Taylor y Makkink) y (0.86 Penman Monteith).

-En las condiciones reales, con lluvias abundantes, los consumos de agua medidos de los eucaliptos fueron mayores que los estimados por las ecuaciones. En ocasiones. Los árboles extrajeron agua por debajo de la profundidad de raíces, debido principalmente al flujo por ascenso capilar desde capas más profundas y húmedas.

-El análisis de los datos indica la importancia de la lluvia y los fenómenos capilares como abastecedores del agua utilizada por los eucaliptos independientemente de otras variables meteorológicas. En otras palabras, el 76.8 % de la precipitación corresponde a la evapotranspiración real del eucalipto medida en el campo, independientemente de las condiciones climáticas. Mientras que la ecuación de Priestley y Taylor en una parte de la curva subestima y en otra sobreestima los requerimientos hídricos del eucalipto en sus dos

estadios: monte joven y monte adulto y las ecuaciones de Makkink y Penman Monteith subestiman en todos los casos. **Figura 1**



**Figura 1**

donde:

PP lluvia medida en mm

ETa evapotranspiración real del eucalyptus dunni adulto

ETj evapotranspiración real del eucalyptus dunni joven

ETrP\_T evapotranspiración real estimada con la ecuación de Priestley y Taylor

ETr\_M evapotranspiración real estimada con la ecuación de makkink

ETrP\_M evapotranspiración real estimada con la ecuación de Penmann\_Monteith

#### 4. CONCLUSIONES

Los tres métodos estiman con un alto grado de ajuste la evapotranspiración real del eucalipto en sus dos estadios.

En un clima templado y húmedo cualquiera de las tres ecuaciones son precisas para estimar los requerimientos hídricos del eucalipto.

Las ecuaciones de estimación correlacionaron mejor con la evapotranspiración potencial del lugar que con las lluvias.

En condiciones de campo, la lluvia, independientemente de otras variables meteorológicas, es la variable que más influye en la evapotranspiración del eucalipto.

Los árboles extrajeron agua por debajo de la profundidad de raíces, debido principalmente al flujo por ascenso capilar desde capas más profundas y húmedas..

## BIBLIOGRAFIA

- Calder, I.R. 1976. The measurement of water losses from a forested area using a natural lysimeter. *J. Hydrol.* 30:311-325.
- Calder, I.R. 1977. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest at Plynlimon, central Wales. *J. Hydrol.* 33:247-265.
- De Wit, C.T. 1958. *Transpiration and Crop Yields*. Wageningen. The Netherlands. Versi-Landbouwk. Onderz 648.88 pp. (Inst. of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage)
- Feddes, R.A. 1987. Crops factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration . *Comm. Hydrol. Res. TNO, The Hague.Proc.and Inf.*39:33-44.
- Franks, S.W., Beven, K.J. 1997. Estimation of evapotranspiration at the landscape scale: A fuzzy disaggregation approach. *Water Resources Research*, 33(12): 2929-2938.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. En: *The state and movement of water in living organisms*. Proceedings of the 19th Symposium, Society of Experimental Biology, Cambridge University Press, London.
- Monteith, J.L. 1963. Gas exchange in plants communities. Environmental control of plant growth. (L.T.Evans,ed.) Academic Press, New York.pp. 95-112
- Monteith, J.L. 1964. Evaporation and environment. *The State and Movement of Water in Living Organisms*. 19th Symp. Soc. Exp. Biol. Academic Press. New York. pp. 205-234.
- Priestley, C.H.B.; Taylor, R.J.. 1972. on the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters,. *Mon. Water Rev.* 100:81-92
- Querner, E.P., van Bakel, P.J.T. 1989. Description of the regional groundwater flow model SIMGRO. Report N°7, Agricultural Research Department, Wageningen, The Netherlands.
- Rebori, MG, Diaz; RA; Damiano. F. Requerimientos de agua del Eucalyptus dunnii en su implantación y monte adulto. Medición y contribución al balance hídrico regional. Investigación Forestal. Proyecto Forestal de Desarrollo. Secretaría de Agricultura, Pesca y Alimentos. Argentina.
- Retta A. and Hanks, R.J. 1980. Corn and alfalfa production as influenced by limited irrigation. *Irrig. Sci.* 1 .135-147.
- Rosenberg, N.J.; Blad, B.L.; Verma, S.B. 1983 *Microclimate. The Biological Environment*. Second edition. New York EEUU.
- Slabbers, P.J. 1977. Surface roughness of crops and potencial evapotranspiración. *J. Hydrol.* 34:181-191
- Slatyer, R.O. y Mellroy, I. C. 1961. *Practical Microclimatology*. CSIRO. Australia y UNESCO.
- Smith, P.J.T. 1987. Variation of water yield from catchments under grass and exotic forest, east Otago. *New Zealand J. Hydrol.* 26:175-184.
- Thornthwaite, C.W. 1948 . An approach toward a racional classification of climate. *Geogr. Rev.* 38:55-94
- Williams, G.D.V. 1972. Geographical variations in yield –weather relationships over a large wheat growing region. *Agric. Meteorol.* 9:265-283.