

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

**INCORPORACIÓN DEL IAF EN MODELOS DE REDISTRIBUCIÓN DE  
PRECIPITACIÓN**

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

*<sup>1)</sup> Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República; <sup>2)</sup> Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República.  
jalonso@fing.edu.uy, lesy@fing.edu.uy, lmartinez@fagro.edu.uy, mcrisci@fing.edu.uy, ssymonds@fing.edu.uy*

**RESUMEN:**

La intercepción de la precipitación por la cubierta vegetal es una de las componentes principales del balance hídrico en los ecosistemas forestales. En Uruguay los programas de monitoreo en plantaciones comerciales de eucaliptos llevados a cabo por la Universidad de la República, establecen que dichas pérdidas se sitúan entre el 22 y el 31% de la precipitación anual. El Índice de Área Foliar (IAF), es la principal variable utilizada para la modelación de procesos como la fotosíntesis y la evaporación del dosel ya que determina el tamaño de la interface planta-atmósfera. En este trabajo se presenta una metodología de aplicación simple que incorpora el IAF como variable de entrada en modelos de redistribución de la precipitación, basada en el modelo de Rutter. La estimación del IAF se realiza mediante la metodología de fotografía hemisférica del dosel y posterior análisis de la imagen digital. El valor obtenido se incorpora en el modelo de redistribución de la precipitación bajo la premisa de que los restantes parámetros varían en forma proporcional al IAF. Se obtiene un buen ajuste del modelo de la redistribución de la precipitación para un período de calibración de 30 meses, con un coeficiente de Nash de 0,77 y una diferencia de 5,2% en el volumen acumulado. A raíz del comportamiento de la simulación realizada, se evidencia la importancia de contar con información meteorológica próxima al sitio de estudio.

**ABSTRACT:**

The interception of rainfall by vegetation canopies is a major component of the surface water balance in forest ecosystems. Monitoring programs undertaken by the Universidad de la República in Uruguay established evaporation losses around 22 and 31% of annual rainfall. The LAI is the main variable used to model many processes, such as canopy photosynthesis and evapotranspiration because it determines the size of the plant-atmosphere interface. This paper presents a methodology of simple application to incorporate LAI as input variable of rainfall partitioning models, based on the Rutter's model. LAI is estimated with hemispherical photography methodology and digital image analysis. The obtained value is entered in the rainfall partitioning model, assuming the other model parameters are linearly proportional to LAI. The model has being calibrated with a good efficiency for a 30 months period, achieving a Nash number of 0,77 and a volume error of 5,2 %. The importance of available meteorological data close to the study site is evidenced by the simulation behavior.

**PALABRAS CLAVES:** intercepción, índice de área foliar, modelación

## **INTRODUCCIÓN**

La forestación industrial se desarrolla en Uruguay a partir de la promulgación de la “Ley Forestal N° 15.939, en diciembre de 1987. Desde entonces, el área forestada en sustitución de pasturas naturales aumenta notablemente año tras año pasando de 45.000 hectáreas en 1990 a cerca de 1:000.000 hectáreas en diciembre de 2009, transformándose 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. Considerando que los suelos definidos como de prioridad forestal abarcan una extensión de 3,6 millones de hectáreas, y que la industria forestal se encuentra en pleno desarrollo, con la instalación de plantas para la producción de pasta de celulosa y aserraderos, se prevé que la superficie plantada continuará creciendo durante los próximos años.

La intercepción de la precipitación por la cubierta vegetal es una de las componentes principales del balance hídrico en los ecosistemas forestales. En Uruguay los programas de monitoreo en plantaciones comerciales de *Eucalyptus sp.* llevados a cabo por la Universidad de la República, establecen que dichas pérdidas se sitúan entre el 22 y el 31% de la precipitación anual. Las plantaciones forestales inciden en una transformación de la precipitación incidente, conocida como redistribución Rutter et al., 1971; Huber and Iroumé, 2001). De la precipitación incidente una fracción atraviesa las copas de los árboles, a través de claros o por goteo, y llega al suelo constituyendo la precipitación directa, mientras que otra escurre por las hojas y ramas hasta alcanzar el tronco principal, y luego escurre por su superficie hasta llegar al suelo, constituyendo el escurrimiento fustal. Este proceso de redistribución de la precipitación y por lo tanto la cantidad de agua que efectivamente alcanza la superficie del suelo, depende fundamentalmente del tipo y densidad de la cubierta vegetal además de los factores climáticos (tasa de evaporación e intensidad de la precipitación). Es por esto que los programas de monitoreo continuo y la modelación del proceso de intercepción son requisitos esenciales para cualquier análisis cuantitativo de los efectos de la forestación, siendo indispensable la correcta estimación de los parámetros que influyen en este proceso para la determinación de las pérdidas en condiciones climáticas variables y para la parametrización de modelos de redistribución.

En particular el Índice de Área Foliar (IAF), variable adimensionada que describe la relación de área total de un lado de tejido fotosintético por unidad de área de suelo, es la principal variable utilizada para la modelación de procesos como la fotosíntesis, la intercepción de la precipitación y la evaporación del dosel ya que determina el tamaño de la interface planta-atmósfera (Weiss et al., 2004).

## **OBJETIVO**

Establecer una metodología de aplicación simple que permita incorporar el índice de área foliar (IAF) como variable de entrada en modelos de redistribución de la precipitación, en este caso una modificación del modelo de Rutter et al. (1975).

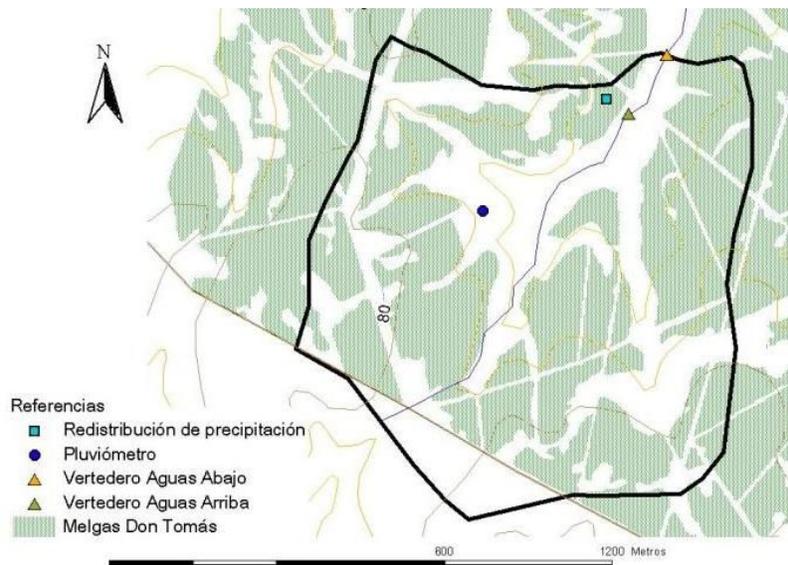
## **ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DE BASE**

La parcela experimental está situada dentro de un rodal de eucaliptus en una microcuenca experimental instrumentada y monitoreada por la UdelaR que se ubica en el en el litoral oeste del país (Figura 1), departamento de Paysandú, siendo su acceso por el Km 48,500 de ruta 90.



**Figura 1.-** Ubicación de las microcuencas experimentales.

El rodal de *Eucalyptus globulus sp. maidenni* fue implantado en el otoño-primavera del año 1998, con una densidad de 895 árboles/ha. El inventario forestal realizado en el rodal en agosto del 2005, dio como resultados una altura media de los árboles de 14,9 m y un DAP (diámetro altura de pecho) de 14 cm. Estimaciones realizadas a fin del año 2008 resultaron en valores similares para DAP y altura de árboles por lo cual se asume que la plantación ya había alcanzado en 2005 su desarrollo completo.



**Figura 2.-** Microcuenca forestada y ubicación de la parcela experimental.

El monitoreo de la precipitación total incidente en la microcuenca forestada se hace con un pluviógrafo (RAINEW 111 Tipping Bucket, Rainwise) ubicado en un claro de la plantación cercano al baricentro de la microcuenca. Próximo a éste se encuentra la estación meteorológica (MK-III-LR, Rainwise) que registra: temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad de viento y precipitación. Esta información sirve de base para el cálculo de la evaporación potencial y permite además realizar la corrección de la información de precipitación de acuerdo a la velocidad del viento.

La precipitación directa es recogida en una canaleta de acero galvanizado, de sección parabólica, de 15 cm de ancho y 35 m de longitud (Huber, A com.pers.; Iroumé y Huber, 2000) forma de registro que asegura que los valores obtenidos son representativos para un ecosistema o estructura del dosel heterogénea. Dicha canaleta drena hacia un tanque de 600 l de capacidad donde las variaciones de nivel son registradas utilizando un sensor de boya (Thalimedes, OTT) en el primer período del monitoreo y uno de presión durante el último año (WT-HR, Trutrack). El tanque es vaciado por una bomba que se activa mediante un sensor de nivel.

Próximos a la canaleta se seleccionaron 10 árboles para la medición del escurrimiento fustal el cual se recoge mediante collarines de goma adheridos al tronco en forma de espiral, según la metodología propuesta por Ford y Deans (1978). Dicho escurrimiento es conducido mediante caños de PVC de 50mm de diámetro hacia otro tanque equipado con limnógrafo y bomba al igual que el anterior.



**Figura 3.-** Instalaciones para la medición de precipitación directa y fustal

### **Análisis de la información**

Entre el 1 de julio de 2006 y el 31 de diciembre de 2009 se registraron 4264 mm de precipitación total incidente en la microcuenca forestal. La información fue analizada en base diaria asumiendo la ocurrencia de un único evento de precipitación al día, esto debido a que el presente estudio pretende generar un modelo de redistribución de la precipitación que sirva como una herramienta de uso simple en el manejo forestal. Dado que la información disponible a nivel general en Uruguay es la precipitación diaria, se optó por esa base temporal para el análisis. Debe considerarse además que tanto la metodología de medición de la precipitación directa y fustal como las características propias de cada evento, generan un retraso en el registro temporal de ambas que varía entre unos pocos minutos y varias horas, esto dificulta un análisis con base temporal horaria por ejemplo.

En ese período pudieron registrarse en forma completa, 217 eventos que totalizan 2766 mm de precipitación total incidente. Los eventos son considerados independientes si el intervalo de tiempo sin lluvia que los separa es de al menos 8 horas, período considerado adecuado para el secado completo del dosel. La intensidad media de los eventos fue de 2,56 mm/h (mediana de 1,45 mm/h), con una duración promedio de 4 h 28 min (mediana de 4 h) y una cantidad media de precipitación por evento de 12,7 mm (mediana de 7,0 mm). La distribución de frecuencia de los eventos muestra una marcada asimetría que explica la diferencia hacia valores menores entre las medianas y las medias tanto en duración como en cantidad de la precipitación.

## METODOLOGÍA

### Estimación del IAF:

La fotografía hemisférica del dosel es una técnica efectiva y de bajo costo para describir cuantitativamente la arquitectura y el régimen de radiación del dosel de un bosque (Jonckheere et al., 2004). Se trata de una foto tomada desde debajo de la cubierta vegetal con un lente hemisférico orientado hacia el zenit, dando un ángulo de visión de 180° y proyectando el hemisferio al plano. El tipo de proyección varía con el lente utilizado, la más común es la proyección polar o equi-angular que asume que el ángulo al zenit de cualquier punto de la bóveda, es directamente proporcional a la distancia a lo largo de un eje radial dentro de la imagen. Resulta así una imagen circular con el zenit en el centro y el horizonte en el perímetro.

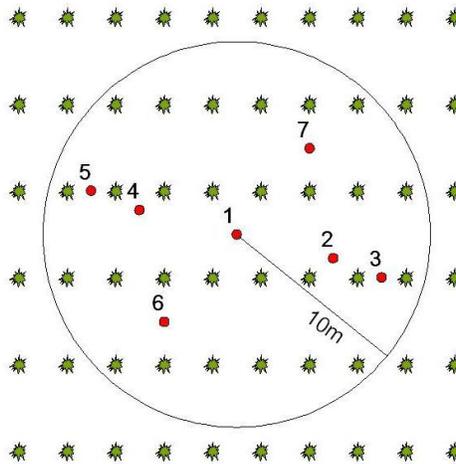


**Figura 4.-** Fotografía hemisférica de parcela experimental de Eucalyptus

El tiempo de exposición del film al tomar la fotografía influye considerablemente en la determinación del IAF, en general subestimándolo, Zhang et al. (2005) desarrollaron un protocolo de campo con el que demostraron que la exposición óptima para obtener valores ajustados de IAF es de 2 veces respecto a la de referencia tomada bajo cielo abierto.

El otro punto crucial del análisis de las fotografías hemisféricas es la elección del umbral de segmentación de la imagen para lograr la separación entre el primer plano (dosel) y el fondo (cielo). Generalmente dicha segmentación se efectúa de manera manual seleccionando para cada imagen un umbral de gris que indique la mejor separación entre el dosel y el cielo. Esta selección manual es un procedimiento inexacto y difícilmente reproducible ya que el resultado es altamente dependiente de la experiencia y del juicio del operador. Nobis y Hunziker (2005) desarrollaron una metodología de determinación del umbral basada en un algoritmo cuyo principio es buscar el valor de umbral para el cual se da el mayor contraste en los bordes, es decir entre las zonas clasificadas como cielo y dosel. Este algoritmo se encuentra implementado en el software SideLook (Nobis, M; disponible en [www.appleco.ch](http://www.appleco.ch)) y fue evaluado satisfactoriamente por sus autores, probando sus ventajas sobre el procedimiento manual ya que logra resultados similares o ligeramente mejores con la ventaja de ser un procedimiento objetivo y con tiempos de cálculo mucho menores.

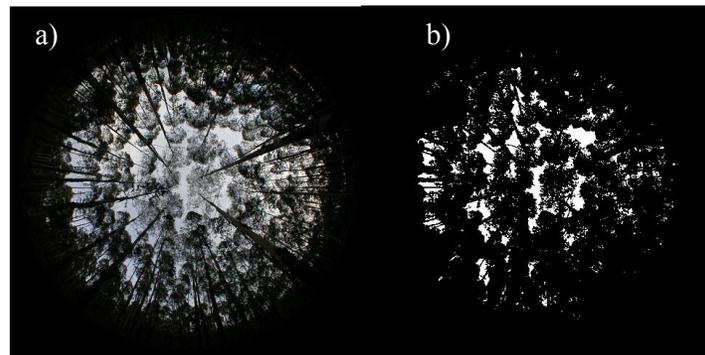
Se utilizó una cámara Nikon CoolPix 4500 con un lente “ojo de pez” FC-E8 adosado. Las fotografías fueron tomadas en cinco parcelas del mismo rodal en que se encuentra la parcela experimental de monitoreo de redistribución de la precipitación y cercanos a esta. La ubicación para la toma de la fotografía es fundamental ya que al estar los árboles plantados en cuadrículas de 4,5 x 2,5m, es esperable que las fotografías tomadas en la fila tengan mayor valor de IAF que las tomadas en la entrefila. La metodología planteada para la toma de las fotografías (Munka, C., 2009, en prensa) considera la selección de parcelas de muestreo de 20 m de diámetro con una superficie de 315 m<sup>2</sup>, dentro de las cuales se tomaron fotografías caracterizables en tres grupos de posiciones relativas: una en la entrefila (posiciones 1, 6 y 7 en la Figura 5); otra entre árboles a 1 metro de la fila (posiciones 2 y 4 en la Figura 5) y la última en la fila (posiciones 3 y 5 en la Figura 5).



**Figura 5.-** Posición de las fotografías dentro de cada parcela.

En cada ubicación y siguiendo la recomendación de Zhang et al. (2005) fueron tomadas fotografías con la misma apertura del lente pero distinta velocidad de disparo. En particular se tomaron 3 fotografías con 1, 2 y 3 veces más la velocidad de disparo determinada automáticamente por la cámara para cielo abierto fuera de la cobertura del bosque, lo que permite posteriormente seleccionar para el análisis la imagen que presente mayor contraste.

Las imágenes fueron analizadas en una primera instancia usando el software SideLook que previo filtrado de la imagen en la banda azul determina automáticamente el umbral de separación entre el primer plano (dosel) y el fondo (cielo) para la obtención de la imagen binaria (Figura 6). Posteriormente la imagen binaria fue analizada con el software GLA (Frazer et al., Canada-USA, 1999) que calcula el IAF y otro conjunto de parámetros que no son considerados en este caso. Los resultados analizados fueron los que arroja el programa como el valor en el cuarto anillo.



**Figura 6.-** a) Imagen original; b) Imagen binaria con determinación automática del umbral.

**El modelo de Redistribución:**

El modelo generalizado por Rutter et al. (1975) requiere como datos de entrada la precipitación en periodos cortos (p.e. horaria) e información meteorológica con lo cual estima la precipitación directa, el escurrimiento fustal y la interceptación. Considera al dosel y los fustes como reservorios que son llenados por la precipitación y vaciados por la evaporación y el drenaje, estimando las tasas de entrada y salida de esos compartimentos. La modificación de éste modelo realizada por Abbot et al. (1986) considera que la cantidad de precipitación interceptada depende de la proporción del suelo cubierto, en proyección plana, por vegetación (hojas y ramas), esa proporción varía pero se considera que tiene un máximo  $p_1$ . Por otro lado la evaporación del agua interceptada ocurre desde toda la superficie del dosel dependiendo de la relación  $p_2$  entre el área total de hojas y el área de suelo cubierta por vegetación, variable que se conoce como Índice de Área Foliar (IAF). En esta

simplificación no se considera la componente del escurrimiento fustal. La variación del almacenamiento del dosel se calcula entonces como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q - ke^{b(C-S)} \quad [1]$$

$$Q = \begin{cases} p_1 p_2 (P - E_p \frac{C}{S}) & \text{si } C < S \\ p_1 p_2 (P - E_p) & \text{si } C \geq S \end{cases} \quad [2]$$

donde:

P: precipitación total incidente (mm)

C: almacenamiento real del dosel

$p_1$ : cobertura máxima del dosel (se considera igual a 1)

$p_2$ : IAF

k : tasa de drenaje del dosel (mm/s)

b: coeficiente empírico del modelo de Rutter ( $\text{mm}^{-1}$ )

S: capacidad máxima de almacenamiento del dosel (mm)

$E_p$ : evaporación potencial

La evaporación potencial fue calculada utilizando la ecuación combinada de Penman-Monteith (Monteith, 1965), teniendo en cuenta la resistencia aerodinámica y considerando nula la resistencia del dosel. La información utilizada en la ecuación es monitoreada en la estación meteorológica ubicada en la microcuenca forestal, que incluye: temperatura, presión, humedad relativa y velocidad del viento. La radiación neta, que no es monitoreada en dicha estación fue obtenida a partir de los datos de horas de brillo solar proporcionados por la estación INIA Salto, localizada a unos 120 km de las microcuencas (información disponible en [www.inia.org.uy](http://www.inia.org.uy)). Las horas de brillo solar fueron transformadas en radiación neta utilizando la metodología descrita en la publicación No. 56 de FAO (Allen et al, 1998). En el período posterior a octubre-07 toda la información meteorológica utilizada corresponde a la estación INIA debido al mal funcionamiento de la estación local.

Según Rutter et al. (1975), el modelo no resulta sensible a variaciones en el parámetro b, que se considera por tanto igual al de ese estudio ( $3,7 \text{ mm}^{-1}$ ), mientras que es moderadamente sensible a las variaciones de k y aún más a las de S. El mismo autor plantea que tanto el parámetro k como el S varían proporcionalmente con el IAF, consideración por demás atendible ya que se trata de parámetros que expresan las características físicas del dosel. Por esto se considera apropiado ajustar el modelo mediante la determinación de dos coeficientes de proporcionalidad ( $C_s$  y  $C_k$ ) que cumplan:

$$S = C_s \cdot IAF \quad [3]$$

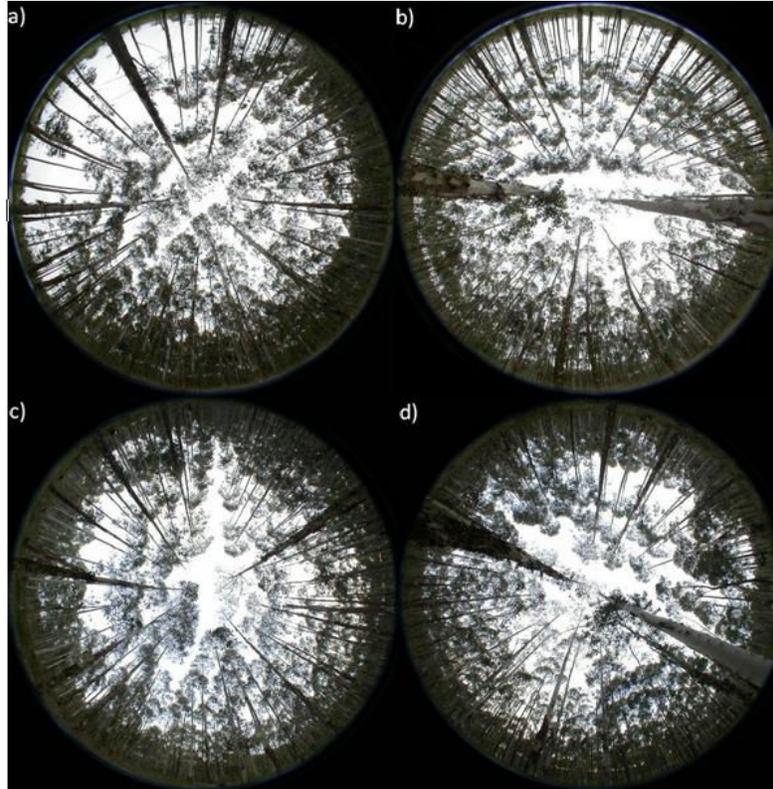
$$k = C_k \cdot IAF \quad [4]$$

La mayoría de los estudios de redistribución utilizan la técnica de Leyton et al. (1967) para determinar los parámetros estructurales del dosel, en particular S. Esta metodología propone la representación grafica de la precipitación total incidente vs precipitación directa para eventos aislados. En primer lugar se estima visualmente la cantidad de precipitación necesaria para exceder la capacidad de almacenamiento del dosel, identificando el punto de inflexión de la gráfica. En segundo lugar una línea recta de pendiente 1, como en Gash y Morton (1978) se “desliza” desde el eje vertical hasta tocar al menos uno de los puntos a la derecha del punto de inflexión. S se obtiene como la intersección de esta línea con el eje vertical.

## RESULTADOS

### Estimación del IAF:

Las fotografías de los distintos sitios muestran una distribución espacial homogénea del dosel, exceptuando los sitios ubicados cerca del límite exterior del rodal y que por tanto muestran menor homogeneidad en la distribución foliar del dosel (Figura 7:).



**Figura 7.-** Fotografías hemisféricas: a) entrefila de parcela central del rodal; b) fila de parcela central del rodal; c) entrefila de parcela en límite exterior del rodal; d) fila de parcela en límite exterior del rodal.

Como era esperable dentro de un mismo sitio se presentaron mayores valores de IAF en las ubicaciones correspondientes a las filas y menores en las entrefilas, como se resume en la Tabla 1:

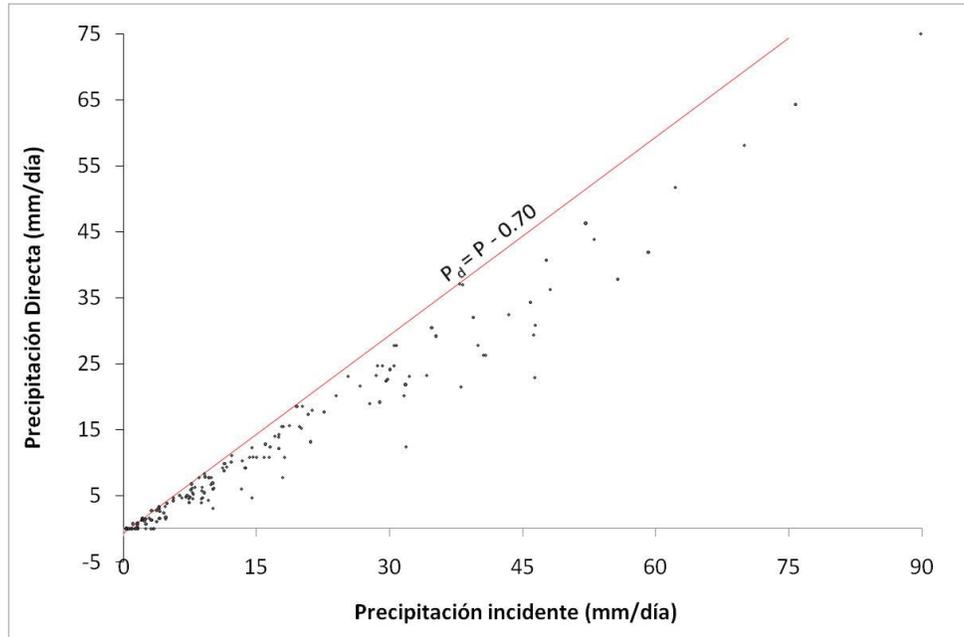
**Tabla 1.-** Valores de IAF para los distintos sitios y posiciones evaluados

|         | Posiciones en la entrefila |      |      |       | Posiciones en la fila |      |      |      |       |
|---------|----------------------------|------|------|-------|-----------------------|------|------|------|-------|
|         | 1                          | 6    | 7    | Media | 2                     | 3    | 4    | 5    | Media |
| Sitio 1 | 1.94                       | 1.67 | 1.81 | 1.81  | 1.84                  | 2.04 | 1.76 | 1.76 | 1.85  |
| Sitio 2 | 1.96                       | 2.44 | 2.24 | 2.21  | 2.39                  | 1.93 | 2.45 | 2.31 | 2.27  |
| Sitio 3 | 1.68                       | 2.02 | 1.5  | 1.73  | 1.68                  | 1.86 | 1.78 | 1.65 | 1.74  |
| Sitio 4 | 1.69                       | 1.77 | 1.64 | 1.70  | 1.82                  | 1.79 | 1.71 | 1.72 | 1.76  |
| Sitio 5 | 1.62                       | 1.35 | 1.56 | 1.51  | 1.68                  | 1.62 | 1.58 | 1.59 | 1.62  |

Sin embargo, analizadas ambas series de datos, la diferencia entre sus valores medios no resultó estadísticamente significativa (prueba t), ni se verificó la independencia entre ambas muestras ya que presentaron la misma distribución (prueba de Kolmogorov-Smirnov). Se considera por tanto válido tomar, como valor representativo del rodal muestreado, el valor medio de la serie de muestras de IAF estimadas mediante la metodología de la fotografía hemisférica, siendo éste  $1,82 \pm 0,27$  (valor medio  $\pm$  desviación estándar).

### El modelo de Redistribución:

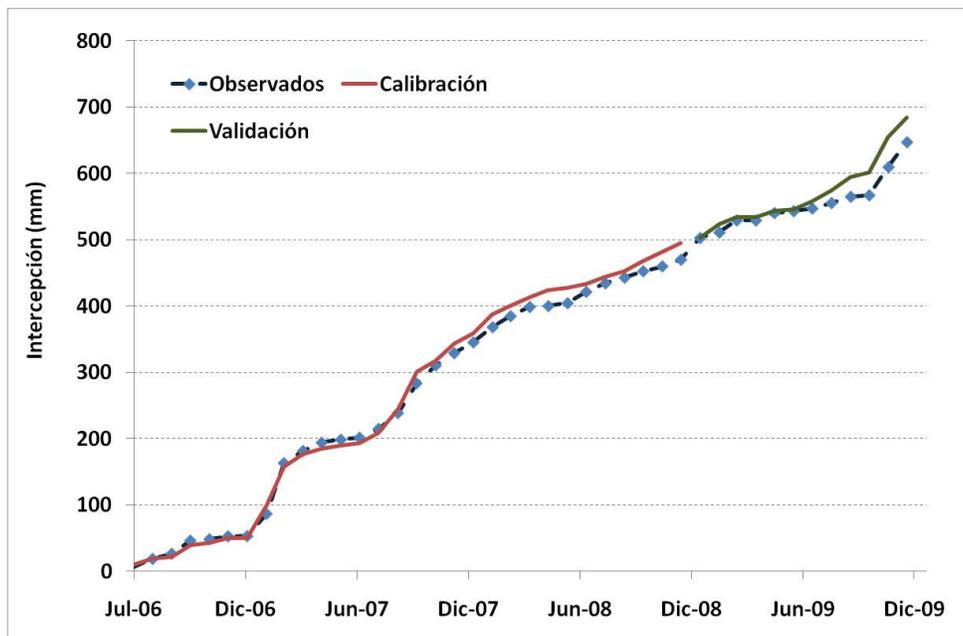
En primer lugar se estimó S (parámetro estructural del dosel), siguiendo la metodología descrita anteriormente. La figura 8 muestra la relación entre la precipitación directa y la precipitación total incidente para los eventos diarios seleccionados, se observan en ella las características típicas de esta relación (Rutter et al., 1971). Como resultado se obtiene una estimación del parámetro S de 0,70 mm.



**Figura 8.-** Relación Precipitación Directa – Incidente, para eventos diarios

Con este valor del parámetro S y considerando que el IAF había sido estimado en 1,82, se obtiene directamente el coeficiente de proporcionalidad  $C_S = 0,385$  mm, parámetro que así fue ingresado al modelo, restando para la calibración el ajuste del coeficiente de proporcionalidad  $C_k$ .

El modelo de Rutter modificado por Abbot fue aplicado con paso de tiempo horario en el período julio 2006 a diciembre 2009, omitiendo aquellos períodos en que los eventos no fueron registrados en forma completa. Para la calibración se comparan los resultados calculados con los acumulados mensuales de las observaciones registradas en el período jul/06-dic/08. Para la pareja de coeficientes de proporcionalidad  $C_S = 0,385$  mm y  $C_k = 3,8 \times 10^{-5}$  mm/s, se logró un ajuste cuyo coeficiente de Nash es de 0,77 y el error en el volumen acumulado, expresado como la diferencia entre observado y calculado en relación al volumen acumulado observado, es de 5,2 %. La validación se realizó en el período ene-dic/09, obteniéndose un coeficiente de Nash de 0,73 y un error en volumen de 6,5 %. La comparación gráfica de ambos períodos se presenta en la Figura 9.



**Figura 9.-** Ajuste del modelo de redistribución

Se observa que el mejor ajuste del modelo corresponde al período jul-06 a diciembre-07, coincidiendo prácticamente con el período de disponibilidad de datos en la estación meteorológica local para el cálculo de la evaporación. Esto demuestra la importancia para el modelo de contar con datos meteorológicos cercanos al sitio. Otra observación refiere al apartamiento de las series observados y calculados en el final del período de validación, en el cual se registraron los eventos con mayor intensidad de precipitación en todo el período monitoreado, superiores a 40 mm/h.

## CONCLUSIONES

Utilizando la técnica de la fotografía hemisférica y analizando las imágenes con el software GLA se determinó el IAF para una parcela experimental de Eucaliptus del tipo *globulus sp. maidenni* implantada en el otoño-primavera del año 1998 con una densidad de 895 árboles/há. Con la incorporación de esta variable y utilizando además como variables de entrada la precipitación y evaporación se ajustó un modelo de redistribución de la precipitación, basado en el modelo planteado por Rutter et al. (1975) y modificado por Abbot et al. (1986), obteniéndose un muy buen ajuste. Para el período de calibración (jul/06-dic/08) se obtuvo un coeficiente de Nash es de 0,77 y un error en el volumen acumulado de 5,2 %; mientras que en la validación (ene-dic/09) se obtuvo un coeficiente de Nash de 0,73 y un error en volumen de 6,5 %. Se verifica la sensibilidad del modelo a la variable de entrada evaporación, confirmando la importancia de contar con información meteorológica en sitio. También se evidencia la necesidad de ampliar la serie de datos incorporando eventos de altas intensidades de precipitación como los registrados en el último período (validación) que no pudieron ser bien simulados en el modelo.

## AGRADECIMIENTOS

La línea de investigación vinculada a los efectos de las plantaciones forestales sobre los recursos naturales aguas y suelos, se inició 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, han sido financiados por el Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J.** (1986). 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.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.** (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper, N° 56. 300 p.
- Ford, E.D. y Deans, J.D.** (1978). The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 15: pp. 901-917.
- Gash, J. H. C., Morton, A. J.** (1978). An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *J. Hydro*, Amsterdam, 38, 49-58.
- Iroumé, A. y A. Huber.** (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque* 21(1), Valdivia, pp. 45-56.
- Jonckheere, I, Fleck, S, Nackaerts, K, Muysa, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F.** (2004). "Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography." *Agric. For. Meteorol.* 121: 19-35
- Leyton, L., Reynolds, E. R., Thompson, F. B.** (1967). Rainfall interception in forest and moorland. W. E. Sopper and H. W. Lull (Ed), *Forest Hydrology* Pergamon, Oxford, pp 163-178.
- Monteith, J.L.** (1965) Evaporation and the Environment, *Symp. Soc. Expl. Biol.*, vol. 19, 205-234.
- Munka, C.** (2009). "Variación del índice de área foliar y de la evapotranspiración en *Pinus taeda* debido al manejo silvicultural". Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay. En prensa.
- Nobis, M., Hunziker, U.** (2005). Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agric. For. Meteorol.* 128: 243-25.
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C., Morton, A.J.** (1971). A predictive model of rainfall interception in forest 1. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine. *Agr. Meteorol.* 9, 367-374.
- Rutter, A. J., Morton, A. J. Robins, P.C.** (1975). A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl Ecol.* 12, 367-380.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I, Coppin, P.** (2004). "Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling." *Agric. For. Meteorol.* 121 (2004) 37-53.
- Zhang, Y., Chen, J. M., Miller, J. R.** (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agric. For. Meteorol.* 133 (2005), 166-181.