

## CONTRIBUCIÓN HÍDRICA DE LA CAPTACIÓN DE NIEBLA AL BALANCE DE UN BOSQUE DE LAURISILVA EN EL PARQUE NACIONAL DE GARAJONAY

A. Ritter<sup>1</sup>, C.M. Regalado<sup>1</sup>, G. Aschan<sup>2</sup> y L.A. Gómez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Canario Inv. Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife; aritter@icia.es.

<sup>2</sup>Applied Botany, University of Duisburg-Essen, Universitätsstr. 5, D-45117 Essen, Alemania

<sup>3</sup>Parque Nacional de Garajonay, Centro de Visitantes Juego de Bolas. La Gomera.

**RESUMEN.** El agua de las nieblas que es captada por la vegetación se considera generalmente como un aporte hídrico adicional en los ecosistemas de laurisilva canaria. Sin embargo, no existen estudios apropiados que cuantifiquen hasta qué punto esta contribución es relevante en el balance de agua del bosque. A partir de mediciones micro-meteorológicas realizadas durante dos años en una cuenca hidrológica del Parque Nacional de Garajonay (La Gomera) se realiza un estudio para cuantificar lo que supone para la zona no saturada del suelo los aportes hídricos del agua de niebla captada. Mediante la aplicación de diferentes modelos que describen los procesos físicos involucrados, tales como el impacto de una gota de agua de niebla en un elemento cilíndrico (hoja acicular), se obtienen estimaciones que indican que la contribución del agua de niebla captada por la vegetación puede resultar relevante para el estado hídrico de la zona no saturada del suelo, bajo ciertas condiciones. Este aporte adicional supone aproximadamente entre 20-45% de la precipitación convencional y se distribuye a lo largo del año pudiendo ser importante durante la época estival seca, en áreas con una importante presencia de vegetación con hoja de tipo acicular (óptimas para la captación del agua de niebla), así como con características propicias para la precipitación de niebla (gran altitud y orientación hacia la dirección predominante de los vientos alisios). Finalmente la contribución de la niebla al balance de la cuenca se cuantifica en términos relativos con respecto a la lluvia interceptada, evapotranspiración potencial y transpiración medida con sensores de flujo de savia.

**ABSTRACT.** Fog captured by vegetation is often considered an additional source of water in the laurel forest ecosystems of the Canary Islands. However, there are not yet appropriate studies that quantify to what extent such a contribution is relevant to the water budget of the forest. From a two-year time series of micrometeorological measurements in a selected watershed of the Garajonay National Park (La Gomera), a study has been carried out in order to quantify the contribution of fog water captured by vegetation to the vadose zone. Making use of different models which describe the physical processes involved,

such as the impaction of fog water drops onto cylindrical elements (needle-like leaves), we obtained estimations which suggest that contribution of fog water captured by vegetation may be relevant to the water status of the vadose zone under certain circumstances. This additional source of water is approximately 20-45% of rainfall and it is distributed along the year, being of importance during the dry summer season, within areas with high density of needle-like trees (optimal for fog water capture), and with favourable conditions for fog precipitation (high altitude and orientation towards the predominant trade winds direction). Finally the contribution of fog water to the water balance of the selected watershed is quantified in relative terms with respect to intercepted rainfall, potential Penman-Monteith evapotranspiration, and transpiration measured with sap flow sensors.

---

### 1. Introducción

Los aportes de agua a la zona no saturada del suelo en ecosistemas naturales provienen principalmente de la precipitación convencional o lluvia. Sin embargo, existen otros mecanismos distintos en los que el agua atmosférica puede incorporarse al suelo. Cuando las nieblas de advección, cargadas de pequeñas gotas de agua, avanzan sobre el terreno, la presencia de obstáculos tiene como resultado el impacto de las gotas en el mismo quedando retenidas en su superficie. Estas pequeñas gotas pueden unirse dando lugar a gotas de mayor tamaño que discurren por el obstáculo y caen al suelo. Este proceso hidrológico, conocido como precipitación de niebla, tiene una gran importancia ecológica en las zonas donde se produce y sobre todo si el régimen de lluvias es bajo (Azevedo y Morgan, 1974; Stadtmüller, 1987; Cavelier y Goldstein, 1989). La importancia del aporte de agua de las nieblas parece evidente en algunas regiones, ya que permite la existencia de una vegetación cuya demanda hídrica no puede ser satisfecha con la lluvia. Este es el caso de los bosques de niebla, de montaña, tropicales en Colombia, Costa Rica, Hawaii, Malasia, Méjico, Puerto Rico,

Venezuela (Zadroga, 1981; Bruijnzeel y Proctor, 1995) y en los ecosistemas de laurisilva de Azores, Madeira y Canarias. En Canarias, los bosques de laurisilva ocupan zonas de barlovento húmedas, en cotas comprendidas entre 550-1500 msnm, donde la incidencia de estratocúmulos es frecuente (Ceballos y Ortuño, 1976; Höllermann, 1981; Santos, 1990) produciendo condiciones de niebla continuamente. La precipitación de niebla depende bastante de cada zona (Walmsley et al. 1996) debido en parte a las características de la vegetación existente y en parte a los factores climáticos y aquellos relacionados con el terreno. Entre los primeros se encuentra: i) la altura, tamaño y estructura de la copa; ii) disposición y propiedades físicas de las hojas; iii) la localización y densidad de árboles; y iv) la presencia y características de epífitos. Los factores climáticos que mayor influencia tienen son: i) la velocidad y dirección del viento; ii) duración y frecuencia de las nieblas; y iii) las características de la niebla (particularmente la distribución de tamaños de gotas y el contenido de agua líquida). Finalmente, la orografía, la elevación y la orientación son factores relacionados con el terreno que también tienen influencia. A pesar de esto, tradicionalmente existe una creencia general de que la existencia del bosque de laurisilva en Canarias es debida al fenómeno de precipitación de niebla, sin tener en cuenta la complejidad de este proceso. Lo cierto es que la contribución hídrica de la niebla al bosque de laurisilva no ha sido confirmada todavía por un estudio apropiado. A partir de una campaña de mediciones durante dos años, realizadas en una cuenca hidrológica en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera) y la aplicación de diferentes modelos para la descripción de los procesos físicos involucrados, se realiza un estudio comparativo para cuantificar lo que supone para la zona no saturada del suelo los aportes hídricos del agua de niebla captada por la vegetación, así como la relación de ésta con otras variables hidrológicas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Zona de estudio

El estudio se realizó en una parcela localizada en una cuenca hidrológica de aproximadamente 43.7 ha, dentro del Parque Nacional de Garajonay (Fig. 1). La zona, situada a 1270 msnm, se encuentra expuesta a los vientos alisios del nordeste, quedando frecuentemente bajo la influencia de una capa de estratocúmulos que, al incidir sobre el terreno, da lugar a condiciones de niebla de advección. Se trata por tanto de una zona potencialmente propicia para la captación del agua de niebla. En general, la orografía presenta laderas escarpadas con pendientes entre 10-40%.

La vegetación forestal existente en la cuenca se puede clasificar en tres unidades o facies: a) Laurisilva de valle con viñátigo, constituida en su mayoría por árboles que llegan a alcanzar los 25 m, donde destacan sobre todo *Persea indica* (L.) Spreng. y *Laurus azorica* (Seub.) Franco. En la penumbra del sotobosque dominan los helechos. b) Laurisilva de ladera y meseta, se trata de

monte-verde mesófilo que constituye una etapa de transición (árboles de 10-15 m de altura) entre la laurisilva de fondo de barranco y los fayales-brezales arbóreos. Es un tipo de laurisilva más empobrecida donde dominan especies como *L. azorica*, *Ilex canariensis* Poir. y *Myrica faya* Ait., junto a grandes ejemplares de *Erica arborea* L. cubiertos parcialmente por epífitos. La presencia de helechos es también notable. c) Fayal-brezal arbóreo, constituido por las especies más resistentes del monte-verde, de 7-12 m de altura, donde dominan claramente *E. arborea*, *M. faya* e *I. canariensis*, siendo más escaso el *L. azorica*. Abundan los musgos, líquenes y epífitos.

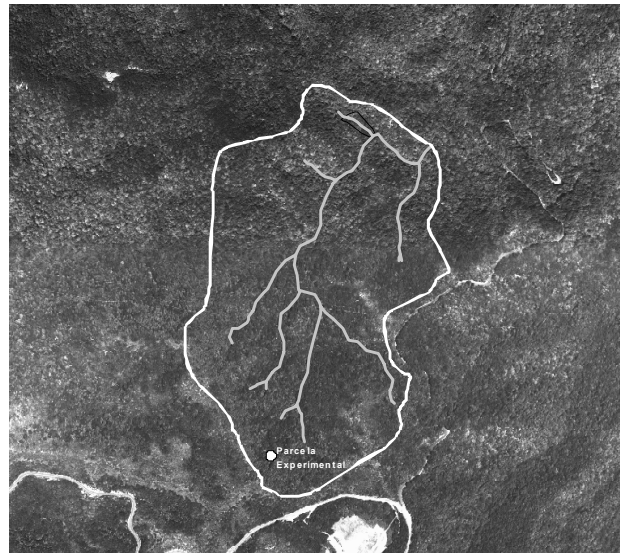


Fig. 1. Localización de la parcela de estudio dentro la cuenca hidrológica en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera).

En concreto, la parcela seleccionada (N28°07'42", O17°15'34") presenta unas dimensiones de 15x20 m y las siguientes especies vegetales: expresado como porcentaje del área basimétrica total, 68 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, *M. faya* constituye la mayor proporción (57%) seguido por *E. arborea* (32.5%) y *L. azorica* (10.5%). En promedio, la altura de los árboles alcanza los 9 m, el diámetro normal (DBH) los 19.8 cm y el área de proyección de la copa, los 6 m<sup>2</sup>. La densidad de árboles en esta zona, así como el índice de área foliar (*LAI*) fueron medidos por Golubic (2001).

### 2.2. Diseño experimental

La parcela seleccionada fue equipada intensamente con instrumentación para el seguimiento de diferentes variables. En una torre arriostrada se instalaron sensores para medir por encima de la cubierta del bosque precipitación, velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar y agua captada de la niebla (Fig. 2). Los datos se recogieron durante un periodo comprendido entre febrero de 2003 y enero de 2005 con una frecuencia de muestreo de 3 minutos y almacenamiento de promedios y totales a intervalos de 15 minutos. Para medir el agua que se puede obtener de la niebla se construyó un captador tipo

estándar (Schemenauer y Cereceda, 1994) basado en una pantalla de 0.5x0.5 m con una malla de polipropileno de tipo Raschel de una sola capa y 65% de cobertura. Así, las gotas de niebla al impactar en la malla quedan retenidas en ésta, agregándose para formar gotas mayores que se deslizan hasta caer al canalón situado en la parte inferior de la pantalla. El agua así recogida se canaliza luego a través de una manguera hasta un pluviómetro registrador de pulsos. Este captador de nieblas se colocó orientado hacia el nordeste, en la dirección predominante de los vientos alisios. Los datos obtenidos se filtraron considerando que el captador recoge agua de niebla sólo en ausencia de lluvia.



Fig. 2. Instrumentación instalada en la parcela experimental.

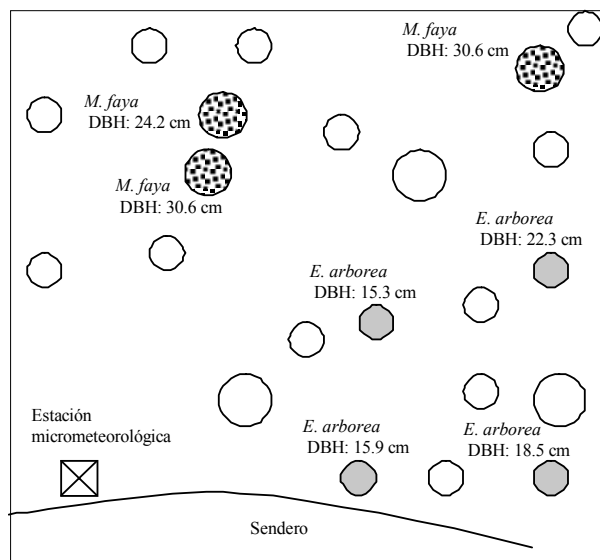


Fig. 3. Distribución de ejemplares en la parcela en los que se midió el flujo de savia para estimar la transpiración real. DBH indica el diámetro normal.

Por otro lado, para la estimación de la transpiración real de los árboles se utilizaron dispositivos basados en dos agujas equipadas cada una con un sensor de temperatura. Éstas se introducen en el tronco del árbol de manera que queden en contacto con los vasos conductores. Una de ellas

dispone además de un generador de calor, de tal forma que la diferencia de temperatura detectada entre ambos sensores está relacionada con la disipación de calor que produce el flujo de savia. La transpiración real del árbol se estima en función del flujo de savia. Dentro de la parcela se seleccionaron diferentes ejemplares de árboles en los que se midió el flujo de savia con esta técnica (Fig. 3).

### 2.3. Captación del agua de nieblas

Considerando que el agua procedente de la niebla captada por la vegetación es principalmente consecuencia de un proceso de impacto de las gotas de la niebla sobre los elementos vegetales (Walmsley et al. 1996), los aportes de agua por la niebla se estimaron mediante el siguiente modelo físico de impacto. Según Goodman (1982) y Walmsley et al. (1996), la cantidad teórica de agua que podría recoger un obstáculo de tipo cilíndrico bajo la influencia de nieblas de advección puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$q = 3.6 w A \eta u \quad (1)$$

donde  $q$  es el caudal ( $l h^{-1}$ ) de agua de niebla sobre el elemento cilíndrico;  $w$  es el contenido de agua líquida de la niebla ( $g m^{-3}$ );  $A$  es la sección transversal ( $m^2$ ) del obstáculo perpendicular a la dirección del viento;  $\eta$  es la eficiencia (-) de captación por impacto; y  $u$  es la velocidad del viento ( $m s^{-1}$ ). La constante 3.6 tiene dimensiones de  $(s h^{-1})(l g^{-1})$ . La eficiencia de captación,  $\eta$ , depende del número de Stokes ( $Stk$ ), que relaciona la distancia de frenado de una partícula (p.ej. una gota) con la dimensión característica del obstáculo. Cuanto mayor sea  $Stk$ , mejor es la eficiencia. La  $\eta$  depende igualmente de la relación  $\phi = Re^2 / Stk$ , donde  $Re$  es el número de Reynolds. Tanto  $\phi$  como  $Stk$  están influidos por la velocidad del viento ( $u$ ) y el diámetro del obstáculo y de las gotas de niebla. Valores de eficiencia para diferentes  $\phi$  y  $Stk$  se obtuvieron según Friedlander (2000).

Este modelo es aplicable a vegetación con hojas aciculares, como es el caso de los árboles de *Erica arborea* que constituyen una proporción significativa del "fayal-brezal" de la laurisilva. El cálculo del agua captada por un árbol con hojas de tipo acicular se realizó de acuerdo con el siguiente procedimiento. Primero se determinó el contenido de agua líquida,  $w$ , mediante la Ec. (1) y los datos de agua recogida por el captador de nieblas. Puesto que el captador de nieblas estaba orientado al nordeste, se utilizó como velocidad de viento eficaz, aquella perpendicular a la superficie de la malla, la cual se calculó a partir de los datos de velocidad y dirección del viento. La eficiencia de captación del captador se estimó a partir de los valores de velocidad de viento eficaz, considerando un diámetro de gota de niebla ( $D_g$ ) de 10 mm (Goodman, 1982; Monteith y Unsworth, 1995) y un diámetro de 1.435 mm para los elementos de la malla del captador ( $D_{fc}$ ). Para estimar la  $\eta$  de los elementos vegetales, se usaron los datos de  $u$ , el mismo  $D_g$  y un diámetro medio de hoja acicular ( $D_v$ ) de  $0.25 \pm 0.02$  mm. El área transversal total perpendicular a la

dirección del viento de la cubierta ( $A_v = 2.77 \text{ m}^2 \text{ árbol}^{-1}$ ) se estimó teniendo en cuenta la densidad de hojas por superficie de suelo ( $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) y la densidad de árboles (árbol  $\text{ha}^{-1}$ ). Considerando que la cubierta está compuesta por elementos cilíndricos orientados de forma aleatoria, el valor de  $A_v$  se redujo mediante un factor de orientación (0.64) (Shuttleworth, 1977). Por otro lado,  $A_v$  se dividió por un factor de abrigo (que tiende a la unidad a medida que la densidad del follaje disminuye). De acuerdo con Shuttleworth (1977), se utilizó un factor de abrigo igual a 2.25.

Según este procedimiento, se calculó la cantidad de agua que recoge un árbol de *E. arborea* en esta zona a intervalos de 15 minutos. Estos valores se expresaron por unidad de suelo teniendo en cuenta la densidad de árboles de esta especie en la parcela de estudio. Hay que incidir en el hecho de que la cantidad de agua que pueden recoger los árboles de hoja ancha lanceolada se consideró despreciable debido a que la eficiencia de captación por impacto de estas hojas es mucho más baja que la de hojas aciculares. Las estructuras de hoja largas favorecen el flujo sobre la superficie foliar de la humedad captada, sin embargo, aquellas en forma de aguja, con diámetros similares al de las gotas, favorecen la captación. Esto se explica, debido a que la eficiencia de captación aumenta al disminuir el diámetro del obstáculo (Ingraham y Matthews, 1988; Goodman, 1982; 1985; Daube et al. 1987).

#### 2.4. Evaporación y evapotranspiración

La ecuación de Penman-Monteith permite estimar la evapotranspiración potencial a partir de lecturas de temperatura, humedad relativa, radiación global y velocidad de viento (Allen et al., 1998). Para tener en cuenta las particularidades en este estudio relativas al bosque y a la disposición de la instrumentación, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones. El albedo se ha tomado igual al valor indicado por Matthews (1984) para bosques siempreverdes subtropicales (es decir 0.11). El índice de área foliar activo, se ha calculado a partir del  $LAI=4.2$  minorado por un factor de abrigo igual a 1.25 (Dingman, 2002). La altura a la que se sitúa el anemómetro y el termohigrómetro fue 13 y 12 m, respectivamente. La resistencia superficial de la cubierta ( $r_c$ ) se ha considerado variable en función de la respuesta estomática a los factores ambientales. De acuerdo con Jarvis (1976) y Stewart (1988) la resistencia estomática de una hoja ( $r_{s_{\min}} \leq r_s \leq r_{s_{\max}}$ ) puede estimarse como el producto del valor mínimo,  $r_{s_{\min}}$ , correspondiente a condiciones óptimas y varias funciones de estrés que dependen cada una de la temperatura, humedad del aire, radiación solar y el potencial de agua en la hoja (y por tanto en el suelo). Siguiendo a Lhomme et al. (1998) para el cálculo de la evapotranspiración potencial puede considerarse una resistencia superficial dependiente sólo de la radiación según la función:

$$r_c = \frac{r_s}{LAI_{act}} = \frac{r_{s_{\min}}}{LAI_{act}} \frac{c + R}{R(1 + c/R_{\max})} \quad (2)$$

donde  $LAI_{act}$  es el índice de área foliar activo;  $R$  es la radiación solar con  $R_{\max} = 1300 \text{ W m}^{-2}$  y  $c$  es un parámetro igual a 100 (Stewart, 1988). Los valores de  $r_{s_{\min}} = 82 \text{ s m}^{-1}$  y  $r_{s_{\max}} = 4100 \text{ s m}^{-1}$  se obtuvieron de González-Rodríguez et al. (2001) considerando la conversión:  $1 \text{ mm s}^{-1}$  equivale  $41 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Para el cálculo de los valores de evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) a intervalos de 15 minutos se preparó un código en Fortran teniendo en cuenta las consideraciones expuestas en este apartado. De forma análoga se calcularon valores de evaporación potencial ( $E_p$ ), asignando un  $r_c = 0$ .

#### 2.5. Estimación del agua interceptada por la vegetación

Entre los diferentes modelos existentes que describen el proceso de interceptación (Rutter et al. 1971; Calder et al. 1986; Eltahir y Bras, 1993; Gash et al. 1995; Valente et al. 1997), se ha elegido la aproximación propuesta por Rutter et al. (1971), en la que las pérdidas por interceptación se determinan realizando un balance hídrico en la cubierta y troncos. Este modelo considera que el agua almacenada en la copa del árbol varía en el tiempo de acuerdo a la siguiente ecuación de continuidad:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I - D - E \quad (3)$$

donde  $S$  es el agua almacenada (mm);  $t$  es el tiempo (min);  $D$  es la tasa de drenaje ( $\text{mm min}^{-1}$ ) y  $E$  es la tasa de evaporación ( $\text{mm min}^{-1}$ ). El agua interceptada por la cubierta,  $I$  ( $\text{mm min}^{-1}$ ), será la suma:

$$I = F + P(1 - p_t - p) \quad (4)$$

donde  $F$  ( $\text{mm min}^{-1}$ ) es el agua de la niebla captada por la vegetación y calculada según el apartado 2.2;  $P$  es la tasa de precipitación ( $\text{mm min}^{-1}$ );  $p_t$  es la fracción de la precipitación que cae sobre los troncos; mientras que  $p$  es la fracción de la lluvia que atraviesa directamente la cubierta (precipitación penetrante), es decir que llega al suelo sin ser interceptada. En este trabajo se utilizó un  $p_t = 1.64\%$  calculado a partir de los valores de *E. arborea*, *M. faya* y *L. azorica* obtenidos por Aboal et al. (1999) en el bosque de laurisilva de Agua García (Tenerife). El valor de  $p = 8.05\%$  se calculó según Van Dijk et al. (2001) tomando el  $LAI = 4.2 \pm 1$  (Golubic, 2001) y un coeficiente de extinción de 0.6. Este valor es similar a  $9.2\%$ , obtenido por Aboal (1998) en el bosque de laurisilva de Agua García.

De acuerdo con la ec. (3), parte del agua interceptada por la cubierta se pierde por evaporación. Según Rutter et al. (1977), la tasa de evaporación se considera proporcional al volumen almacenado en la cubierta y éste puede exceder temporalmente la cantidad máxima de almacenamiento de la cubierta ( $c_{\max}$ ) de tal forma que:

$$E = \begin{cases} E_p & ; S > c_{\max} \\ E_p \frac{S}{c_{\max}} & ; S \leq c_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Watanabe y Mizutani (1996) comprobaron que esta hipótesis es apropiada para valores intermedios de LAI, pero sobreestima la evaporación en bosques densos (LAI≈6) y la infravalora en bosques dispersos (LAI≈1).

La tasa de drenaje se considera que viene descrita por la siguiente ecuación exponencial:

$$D = \begin{cases} D_s \exp[b(S - c_{\max})] & ; S > c_{\max} \\ 0 & ; S \leq c_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

donde *D* no puede ser mayor que el agua almacenada en la cubierta y disponible para drenaje según la ec. (3). Gash y Morton (1978) sugieren que los parámetros empíricos de la ec. (6), *D<sub>s</sub>* y *b*, pueden tomarse de Rutter et al. (1971). No obstante conviene realizar una corrección para tener en cuenta el LAI o el *c<sub>max</sub>* correspondiente (Rutter et al. 1975; Aboal, 1998). Así, para este trabajo los valores resultantes fueron: *D<sub>s</sub>*= 2.31·10<sup>-3</sup> mm min<sup>-1</sup> y *b*= 4.281.

La cantidad máxima de almacenamiento de la cubierta (*c<sub>max</sub>*) de nuestro bosque se estimó a partir del método propuesto por Leyton (1967). Este consiste en seleccionar eventos (precedidos de un día sin lluvia) en los cuales la precipitación haya sido lo suficientemente grande para saturar la cubierta (p.ej. >2mm). Representando estos valores, con datos correspondientes de precipitación penetrante (*pP*) es posible ajustar una recta con pendiente (1- *p<sub>t</sub>*) de tal forma que el corte con el eje de ordenadas indica el valor de *c<sub>max</sub>*. Usando datos de lluvia acumulados en periodos de 12 horas, así como datos recogidos con pluviómetros situados bajo la cubierta del bosque, la aplicación del método de Leyton (1967) se corresponde con la siguiente gráfica donde *c<sub>max</sub>* resulta igual a 1.215 mm.

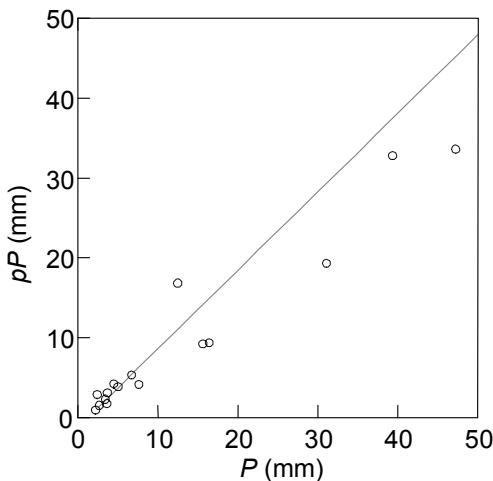


Fig. 4. Aplicación del método propuesto por Leyton (1967) para la estimación de *c<sub>max</sub>*.

El balance de agua en los troncos se realiza de forma análoga aplicando la Ec. (3) con las siguientes

consideraciones: El agua que llega a los troncos viene dado por *I<sub>t</sub>*= *p<sub>t</sub>**P*. La tasa de drenaje se supone instantánea (*D<sub>t</sub>*= *S<sub>t</sub>* - *c<sub>max</sub>*; *S<sub>t</sub>* > *c<sub>max</sub>*). La tasa de evaporación, *E<sub>t</sub>*, es análoga a la ecuación (5) pero suponiendo que la tasa potencial es como máximo un 10% de la *E<sub>p</sub>* (*E<sub>pt</sub>*=0.1 *E<sub>p</sub>*). El valor de capacidad máxima de almacenamiento en los troncos (*c<sub>t, max</sub>*= 0.08 mm) se tomó de Aboal (1998).

En consecuencia, el aporte de agua al suelo se calcula como la suma de la lluvia que no es interceptada, más el drenaje de la cubierta y de los troncos:

$$I_s = pP + D + D_t \quad (7)$$

### 2.6. Estimación del agua transpirada por la vegetación

El cálculo de transpiración a partir de las medidas de disipación de calor proporcionadas por los sensores de medida de flujo de savia se lleva a cabo en tres pasos (Cermák et al. 2004): 1) En primer lugar, a partir de los incrementos máximos de temperatura diarios del sensor de savia en ausencia de radiación (*ΔT<sub>night</sub>*) y para un tiempo determinado (*ΔT<sub>actual</sub>*) se obtiene la densidad de flujo de savia, *v* (ml cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>), mediante (Granier, 1985)

$$v = 0.714 \left( \frac{\Delta T_{\text{night}}}{\Delta T_{\text{actual}}} - 1 \right)^{1.231} \quad (8)$$

2) Los valores de flujo, *v*, obtenidos a partir de la ec. (8) se integran en la dirección radial del tronco proporcionando así el flujo volumétrico, *Q<sub>SF</sub>*, o transpiración (ml min<sup>-1</sup>) del árbol en el que se han insertado los sensores:

$$Q_{SF} = 2\pi \int_{r_h}^{r_x} r v_l dr \quad (9)$$

siendo *v<sub>l</sub>* la densidad de flujo (expresada como tanto por ciento sobre el máximo), con respecto al % del radio del tronco, *r*, a la profundidad *l*, y donde la integral en la Ec. (9) se evalúa en el intervalo radial (*r<sub>h</sub>*, *r<sub>x</sub>*) que delimitan los vasos conductores. Los valores de *v<sub>l</sub>* se obtienen a partir de medidas puntuales de flujo de savia a distintas profundidades a lo largo del xilema, a las que posteriormente se ajustan funciones polinómicas, lo que permite evaluar de forma analítica la integral en la Ec. (9); 3) Finalmente, los valores de transpiración obtenidos a nivel del árbol, *Q<sub>SF</sub>*, pueden ser extrapolados al bosque a partir de un inventario botánico y escalado, conocida la distribución de un parámetro biométrico apropiado como el área basal o el diámetro normal (DBH).

### 3. Resultados y discusión

Los totales anuales de las variables hidrológicas estudiadas se resumen en la Tabla 1. Agrupando los

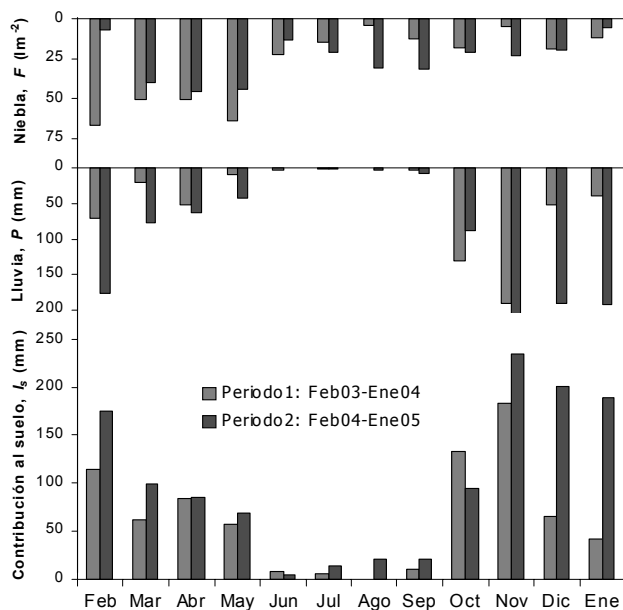
resultados en periodos de 12 meses, el Periodo1 engloba los meses de febrero 2003 hasta enero 2004, mientras que el Periodo2 abarca desde febrero 2004 a enero 2005. Los aportes hídricos por la niebla ( $F$ ) son similares en ambos periodos e inferiores a la lluvia observada. Sin embargo, la precipitación ( $P$ ) en el segundo periodo fue aproximadamente el doble que en el primero. Por otro lado, la evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) anual coincide en ambos periodos.

**Tabla 1.** Totales anuales de las variables hidrológicas estudiadas <sup>a</sup>.

	$F$ (mm)	$P$ (mm)	$ET_p$ (mm)
Periodo1	342	575	1315
Periodo2	303	1070	1314

<sup>a</sup> Periodo1: Feb03–Ene04; Periodo2: Feb04–Ene05

La Fig. 5 muestra la evolución mensual de los aportes hídricos por parte de la lluvia y la niebla en ambos periodos. Se observa como la lluvia presenta estacionalidad, extendiéndose la época seca desde junio hasta septiembre. Por el contrario, aunque los totales mensuales del agua de niebla captada por la vegetación son menores que la lluvia, éstos se distribuyen a lo largo del año, siendo los meses de marzo a mayo los que mayores volúmenes presentan. Como consecuencia de estos aportes, la principal entrada de agua al suelo es consecuencia de la precipitación, salvo durante la época estival donde sólo la precipitación de niebla contribuye al agua de la zona no saturada del suelo.



**Fig. 5.** Aportes hídricos mensuales al bosque y su contribución al suelo en los periodos estudiados.

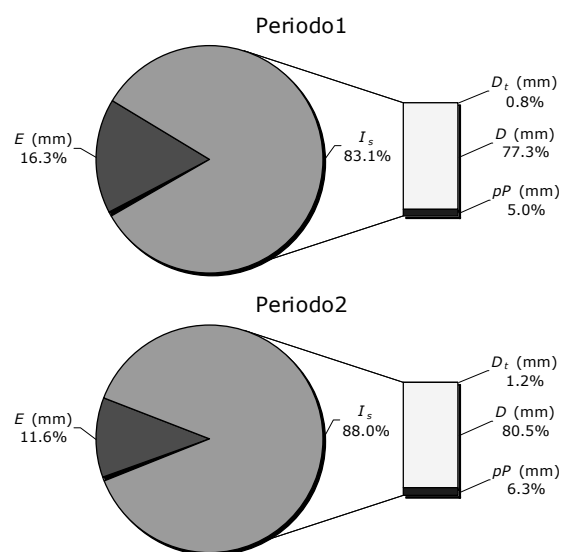
Con respecto de la importancia del agua de niebla captada por la vegetación, la Tabla 2 permite comparar los totales anuales estimados de las pérdidas por interceptación ( $E$ : evapotranspiración desde la copa y los troncos), así como los aportes de agua al suelo ( $I_s$ ) teniendo en cuenta o no la contribución hídrica de la niebla.

**Tabla 2.** Comparación de las variables hidrológicas considerando o no la contribución hídrica por las nieblas.

	Con niebla		Sin niebla	
	$E$ (mm)	$I_s$ (mm)	$E$ (mm)	$I_s$ (mm)
Periodo1	153	763	77	498
Periodo2	163	1208	71	997

De acuerdo con los valores obtenidos, la niebla supone un aporte hídrico que aumenta las pérdidas por interceptación, pero también contribuye al contenido de humedad de la zona no saturada con un promedio de 238 mm en ambos periodos. Esta cantidad supone aproximadamente el 45 y 20% de la precipitación observada en el primer y segundo periodo, respectivamente. En ambos periodos, la contribución conjunta de la lluvia y la niebla al agua del suelo está por encima del 80% del aporte total. Este valor proviene principalmente del drenaje desde las copas de los árboles ( $D$ ). El agua que drena de los troncos ( $D_t$ ) supone aproximadamente un 1%, mientras que la precipitación penetrante ( $pP$ ) está alrededor de un 5-6% (Fig. 6).

Teniendo en cuenta los valores calculados de  $ET_p$  se observa que en esta zona del bosque de laurisilva el balance de agua en el suelo está afectado por altos valores de evapotranspiración. Durante el Periodo1 los aportes hídricos procedentes de la lluvia y la niebla suponen sólo un 58% de la  $ET_p$ , mientras que durante el Periodo2 este porcentaje asciende al 92% como consecuencia de la mayor cantidad de lluvia observada.



**Fig. 6.** Distribución de los aportes hídricos procedentes de la lluvia y la niebla.  $E$ : evapotranspiración;  $I_s$ : aportes de agua al suelo;  $D_t$ : tasa de drenaje del tronco;  $D$ : drenaje de la cubierta;  $pP$ : precipitación penetrante.

Los valores de transpiración obtenidos a partir de medidas con sensores de savia, confirman la alta tasa de pérdida de agua en la zona no saturada como consecuencia de la vegetación, con valores medios de 1144 l año<sup>-1</sup>árbol<sup>-1</sup> para *E. arborea* y 3345 l año<sup>-1</sup>árbol<sup>-1</sup> para *M. faya*. Los

valores de transpiración medidos con sensores de savia, y los estimados por Penman-Monteith siguen una evolución coherente, lo que permite por un lado validar la aproximación de Penman-Monteith, y por otro extrapolar medidas puntuales de transpiración a nivel de árbol al resto del bosque (Fig. 7).

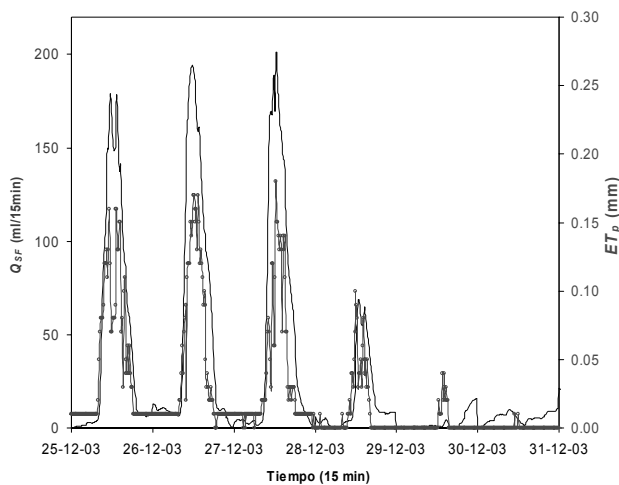


Fig. 7. Un ejemplo de la evolución de la transpiración,  $Q_{SF}$ , medida con sensores de flujo de savia (línea continua) y de  $ET_p$  (-o-) estimada a partir de medidas micrometeorológicas en *E. arborea*.

#### 4. Conclusiones

En el bosque de laurisilva del Parque Nacional de Garajonay, el agua procedente de las nieblas de advección que es captada por la vegetación es importante para el estado hídrico de la zona no saturada del suelo. Este aporte adicional supone aproximadamente entre 20-45% de la precipitación convencional. Aunque la lluvia es la principal fuente de agua en la zona estudiada, ésta presenta estacionalidad. Por el contrario, la precipitación de niebla se distribuye a lo largo del año aportando cierta cantidad de agua al suelo durante la época estival seca. Es importante destacar que estas conclusiones deben restringirse sólo a zonas del Parque Nacional donde exista una importante presencia de vegetación con hoja de tipo acicular (aptas para la captación del agua de niebla), así como con características propicias para la precipitación de niebla (gran altitud y orientación hacia la dirección predominante de los vientos alisios). Por último, los resultados aquí obtenidos son estimaciones a partir de modelos que se han aplicado satisfactoriamente en otros estudios, pero que en futuros trabajos deben ser contrastados para las condiciones del Parque Nacional de Garajonay.

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado con fondos del INIA-Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias (Proyectos RTA2005-228 y RTA01-097). Los autores quieren agradecer al Dr. R. Muñoz Carpena (Universidad de Florida) su participación en el desarrollo y puesta en marcha del proyecto RTA01-097. Parte de este trabajo ha sido desarrollado durante una estancia del Dr. A. Ritter en la Universidad de Florida, por lo que el autor quiere agradecer el apoyo de esta universidad. Igualmente los autores agradecen el apoyo prestado por el personal del Parque Nacional de Garajonay especialmente su director A. Fernández.

#### Referencias

- Aboal, J. 1998. Los flujos netos hidrológicos y químicos asociados de un bosque de laurisilva en Tenerife. Tesis doctoral, Universidad de La Laguna, La Laguna.
- Aboal, J., Morales, D., Hernández, M.S. y Jiménez, M.S. 1999. The measurement and modelling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. *J. Hydrol.* 221: 161-175 pp.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: 300 pp.
- Azevedo, J. y Morgan, D.L. 1974. Fog precipitation in coastal California forests. *Ecolog.*, 55: 1135-1141 pp.
- Bruijnzeel, L.A. y Proctor, J. 1995. Hydrology and biochemistry of tropical montane cloud forests: What do we really know?. En: L.S. Hamilton, J.O. Juvik y F.N. Scatena (Editors). 38-78 pp. Tropical montane cloud forests. Ecological Studies no. 110. New York: Springer-Verlag.
- Calder, I.R. 1986. A stochastic model of rainfall interception. *J. Hydrol.* 89: 65-71 pp.
- Cavelier, J. y Goldstein, G. 1989. Mist and fog interception in elfin cloud forests in Colombia and Venezuela. *Journal of Tropical Ecology*, 5: 309-322 pp.
- Ceballos, L. y Ortuño, P. 1952. El bosque y el agua en Canarias. *Montes*, 8: 418-423 pp.
- Cermák, J., Kubera, J. y Nadezhkina, N. 2004. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 18: 529-546 pp.
- Daube, B., Kimball, K.D., Lamar, P.A. y Weathers, K.C. 1987. Two new ground-level cloud water sampler designs which reduce contamination. *Atmos. Environ.* 4: 893-900 pp.
- Dingman, L. 2002. Physical Hydrology, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Eltahir, E.A.B. y Bras, R.L. 1993. A Description of Rainfall Interception Over Large-areas, *Journal of Climate* 6: 1002-1008 pp.
- Friedlander, S.K. 2000. Smoke, dust, and haze: Fundamentals of aerosol dynamics. New York: Oxford University Press.
- Gash, J.H.C. y Morton, A.J., 1978. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *J. Hydrol.* 38: 49-58 pp.
- Golubic, I. 2001. Vegetationskundliche Analyse von Lorbeerwald-und ähnlichen Beständen im Rahmen einer Untersuchung des Landschaftswasserhaushalts im Garajonay National Park La Gomera (Kanarische Inseln). Diploma Thesis, Universidad de Duisburg-Essen, Alemania.
- González-Rodríguez, A.M., Morales, D y Jiménez, M.S. 2001. Gas exchange characteristics of a Canarian laurel forest tree species (*Laurus azorica*) in relation to environmental conditions and leaf canopy position. *Tree Physiology* 21: 1039-1045 pp.
- Goodman, J. 1982. Water potential from advection fog. Progress Report 1. Department of Meteorology, San Jose State University.
- Granier A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure dy flux de seve brute dans le trons des arbres. *Ann. Sci. For.* 22: 193-200 pp.
- Höllermaun, P. 1981. Microenvironmental studies in the laurel forest of the Canary Islands. *Mountain Research and Development*, 3-4: 193-207 pp.
- Ingraham, N.L. y Matthews, R.A. 1988. Fog drip as a source of groundwater recharge in northern Kenya. *Water Resour. Res.* 24: 1406-1410 pp.
- Jarvis, P.G. 1976. The interpretation of leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, 273: 593-610 pp.
- Leyton L., Reynolds R. C. y Thompson F. B. 1967. Rainfall interception in forest and moorland. In: Sopper, W.E. y H.W. Lull (Eds.). 163-179 pp. Forest Hydrology. Oxford: Pergamon Press.
- Lhomme, J.-P., Elguero, E. Chehbouni, A. y Boulet, G. 1998. Stomatal control of transpiration: Examination of Monteith's formulation of canopy resistance. *Water Resour. Res.* 34: 2301-2308 pp.
- Lloyd, C.R., Gash, J.H.C., Shuttleworth, W.J., Marques, F. y De O, A. 1988. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian Rain Forest. *Agric. For. Meteorol.* 43: 277-294 pp.

- Matthews, E. 1984. Vegetation, Land-Use and Seasonal Albedo Data Sets. In Global Change Data Base Africa Documentation, Appendix D., NOAA/NGDC
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C. y Morton, A.J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forests, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agric. Meteorol.* 9: 367-384 pp.
- Rutter, A.J., Morton, A.J. y Robins, P.C. 1975. A predictive model of interception loss in forest. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl. Ecol.* 12: 367-380 pp.
- Santos, A. 1990. Evergreen forests in the Macaronesian region. Council of Europe, Strasbourg.
- Schemenauer, R. y Cereceda, P. 1994. Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum* 18: 91-100 pp.
- Stadtmüller, T. 1987. Cloud forests in the humid tropics. Costa Rica: The United Nations University.
- Stewart, J.B. 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 43, 19-37 pp.
- Van Dijk, A.I.J.M. y Bruijnzeel, L.A. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. 1. Model description. *J. Hydrol.* 247: 230-238 pp.
- Valente, F., David, J.S. y Gash, J.H.C. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *J. Hydrol.* 190: 141-162 pp.
- Walmsley, J.L., Schemenauer, R y Bridgman, H.A. 1996. A method for estimating the hydrologic input from fog in mountainous terrain. *J. Appl. Meteor.* 35: 2237-2249 pp.
- Watanabe, T. y Mizutani, K. 1996. Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 80: 195-214 pp.
- Zadroga, F. 1981. The hydrological importance of a montane cloud forest area of Costa Rica. En: R. Lal y E.W. Russel (Editors), 59-73 pp. *Tropical Agricultural Hydrology*. New York: John Wiley & Sons Ltd.