

## ESTUDIO DE LA CONTRIBUCIÓN DEL AGUA DE NIEBLA A LA ZNS MEDIANTE ISÓTOPOS ESTABLES

C.M. Regalado<sup>1</sup>, J.C. Guerra<sup>2</sup>, A. Ritter<sup>3</sup> y M.T. Arencibia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Canario Inv. Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife. e-mail: [cregalad@icia.es](mailto:cregalad@icia.es).

<sup>2</sup> Universidad de La Laguna, Facultad de Física, Grupo de Investigación en Hidrometeorología, Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n, La Laguna 38271 Tenerife. e-mail: [jguerra@ull.es](mailto:jguerra@ull.es), [mtarenci@ull.es](mailto:mtarenci@ull.es).

<sup>3</sup> Universidad de La Laguna, Área de Ingeniería Agroforestal, Ctra. Geneto, 2, La Laguna, 38200 Tenerife. e-mail: [aritter@ull.es](mailto:aritter@ull.es).

**RESUMEN.** Los bosques de laurisilva y fayal-breza presentes en Canarias están asociados a condiciones de niebla cuya interceptación y consecuente precipitación e incorporación al suelo es, a fecha de hoy, todavía objeto de controversia. Medidas clásicas mediante pluviómetros distribuidos bajo el dosel vegetal o con captadores de niebla por encima de la cubierta forestal no han conseguido zanjar el debate de hasta qué punto la precipitación horizontal supone un aporte significativo de agua y/o nutrientes para este tipo de bosques nubosos. De forma alternativa, la distinta composición de isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  que presentan el agua de niebla y la precipitación, consecuencia de los diferentes procesos meteorológicos que las originan, permite el seguimiento de estas variables a través de la zona no saturada. Se propone para ello un diseño experimental que compara los contenidos isotópicos de la lluvia y agua de niebla recogida de forma activa sobre el dosel, así como de la solución extraída a lo largo del perfil del suelo en un bosque de fayal-breza. Se pretende con ello determinar el destino del agua (niebla y lluvia) y cuantificar su contribución al ecosistema forestal.

**ABSTRACT.** The laurel and *fayal-breza* (wax myrtle-tree heath) forests present in the Canary Islands are associated with foggy conditions whose interception and subsequent precipitation and soil incorporation is, as of today, still controversial. Classic measurements by rain gauges distributed under the canopy or fog catchers above the forest cover have failed to settle the debate of how horizontal precipitation is a significant contribution of water and/or nutrients for these cloud forests. Alternatively, the distinct  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  stable isotope composition present in fog and precipitation, due to the different meteorological processes that cause them, allows tracking them through the vadose zone. It is thus proposed an experimental design for comparing the isotope content of the rain and fog water collected actively above the canopy, and the extracted solution from a soil profile in a *fayal-breza* forest. The aim is to determine the fate of water (fog and rain) and quantify their contribution to the forest ecosystem.

### 1.- Introducción

Los ecosistemas de laurisilva y fayal-breza existentes en las Canarias occidentales y en otras islas Macaronésicas de la región intertropical, se encuentran asociados a una franja cuasi-permanente de nubes entre 900-1500 m s.n.m. Ésta se produce como consecuencia de la estructura térmica vertical de la atmósfera en estas latitudes, que se caracteriza en su parte baja por la existencia de una inversión térmica, resultado de la subsidencia asociada a la rama descendente de la célula de circulación general de Hadley (Guerra et al., 2007). Ello ha permitido la conservación de un bosque nublado (*'cloud forest'*) relicto (Höllermann, 1981), con presencia de abundantes musgos y otros briófitos, así como de especies vegetales umbrófilas en el sotobosque. Entre las plantas vasculares características del fayal-breza se encuentran árboles perennifolios de hoja lanceolada o tipo lauroide como la faya (*Myrica faya* Ait.), el acebicho (*Ilex canariensis* Poir.) y el laurel (*Laurus novocanariensis* Rivas-Mart. et al.), o de hoja aciculada tales como el brezo de porte arbóreo (*Erica arborea* L.) y el tejo (*E. scoparia* L.) (Pérez de Paz et al., 1990). La frecuente presencia de nieblas y el consecuente goteo bajo la cubierta, debido a la interceptación de las microgotas por parte de las hojas ceras de árboles y el escurrido de epífitos, ha llevado a algunos autores (Marzol-Jaén et al., 2011) a proponer injustificadamente que la precipitación horizontal supone un aporte significativo de agua en este tipo de bosques (Regalado y Ritter, 2013). Es más, tanto en la literatura científica como en la de carácter divulgativo se encuentra extendida la idea de considerar la laurisilva como “bosque esponja” o como formación boscosa que “recarga el acuífero” mediante interceptación de la niebla. Lo cierto es que hasta la fecha ningún estudio ha confirmado inequívocamente este fenómeno. Por el contrario, algunos trabajos tan atrás en el tiempo como las detalladas medidas realizadas por Kämmer (1974) en los bosques de laurisilva de Tenerife, ya indicaban en la dirección opuesta, esto es que, aunque la precipitación de niebla es evidente en estos característicos ecosistemas húmedos, ésta no suponía un aporte importante al balance hidrológico. Esto, sin embargo, ha sido obviado en publicaciones posteriores. Los motivos de esta posible sobrestimación del agua procedente de la niebla, algunos de ellos ya apuntados por Kämmer (1974), son varios:

consideración de fenómenos locales, por ejemplo a nivel de árboles aislados expuestos o singulares, como aplicables a todo el bosque (Ceballos y Ortuño, 1952; Regalado y Ritter, 2010a; Prada et al., 2012); baja representatividad de las medidas de escurrido y goteo realizadas bajo el dosel vegetal (Santana (1986); Regalado y Ritter, 2010a; García-Santos y Bruijnzeel, 2011; Ritter y Regalado, 2013); o la errónea inferencia, a partir de medidas de captación de niebla por métodos artificiales, que la cantidad de agua así recogida es potencialmente equivalente a la que sería interceptada por la vegetación (García-Santos y Bruijnzeel, 2011; Marzol-Jaén et al., 2011; Regalado y Ritter, 2013). Es por ello que la correcta cuantificación del aporte de agua de niebla al suelo está íntimamente ligada a la metodología empleada. De forma clásica y hasta la fecha, los estudios sobre niebla realizados en Canarias han utilizado captadores tipo QFC (*'quarter fog collector'*) y/o pluviómetros (o colectores equivalentes) distribuidos bajo el dosel (Kämmer, 1974; Santana, 1986; Aboal et al., 2000; Ritter et al., 2008; Marzol-Jaén et al., 2011). Los primeros proporcionan una indicación de la frecuencia y potencial aporte de agua de niebla, aunque debidamente calibrados permitirían estimar el aporte real (Demoz et al., 1996; Ritter et al., 2008; Katata et al., 2009). Los pluviómetros o dispositivos de recolección similares dispuestos bajo la cubierta, por el contrario, permiten una medida del goteo de lluvia y/o niebla interceptada, y por tanto una estimación directa del agua que alcanza el suelo, siempre y cuando su número y distribución resulten apropiados para caracterizar la alta variabilidad espacial característica de un bosque (Aboal, 1998; Regalado y Ritter, 2010b; Ritter y Regalado, 2010). En este trabajo se propone el seguimiento de la composición en isótopos estables,  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ , del agua de niebla y de la precipitación. Asumiendo una composición isotópica diferente para ambos (la niebla presenta generalmente un enriquecimiento en isótopos pesados respecto a la precipitación), las medidas permitirán estimar la contribución relativa del agua de niebla y de la precipitación a la zona no saturada, donde se realizarán extracciones de agua a diferentes profundidades y se analizarán sus marcas isotópicas. La hidrología isotópica se fundamenta en la utilización de los isótopos del agua ( $^{18}\text{O}$ , deuterio y tritio, fundamentalmente) para seguir los movimientos de ésta a través del ciclo hidrológico tanto en la parte atmosférica como en la terrestre a nivel de los distintos tejidos vegetales, goteo bajo la vegetación, la zona no saturada, el acuífero o en el flujo superficial (Scholl et al., 2010). Así, la relación de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) e hidrógeno ( $\delta^2\text{H}/\text{H}$ ) muestra, por ejemplo, que la composición isotópica de la precipitación refleja el transporte y los procesos de mezcla de masas de aire, lo que permite establecer una relación entre la composición isotópica de la precipitación y las condiciones climáticas actuales. Por otro lado, parece que existe una relación aparente entre temperatura y contenido isotópico del agua de precipitación (Rozanski et al., 1992), lo que confiere a estas técnicas una importancia paleoclimática indiscutible.

Estas aplicaciones hidroclimáticas de los isótopos del agua han llevado a la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA: International Atomic Energy Agency), en colaboración con la Organización Meteorológica Mundial (WMO: World Meteorological Organization), a desarrollar y poner en marcha una red internacional de medición de isótopos en aguas de precipitación, denominada Global Network for Isotopes in Precipitation (GNIP), que entró en funcionamiento en la década de los 60 y con la que se pretende caracterizar la variabilidad isotópica en la precipitación a lo largo de todo el planeta. Actualmente este proyecto se ha ampliado, analizando la composición isotópica de agua de lluvia de determinados eventos e, incluso, a propuesta de nuestro grupo de investigación en Hidrometeorología, incluyendo el análisis de agua de niebla. Las técnicas usadas para la determinación de las relaciones isotópicas del agua son la espectroscopía de masas de razones isotópicas (IRMS) y la espectroscopía de absorción láser. Tradicionalmente la IRMS ha sido la técnica más empleada, aunque el desarrollo de nueva instrumentación basada en la espectroscopía de absorción láser ha permitido reducir el tiempo de análisis de las muestras y ampliar por tanto el rango de aplicación de estas técnicas a muchos otros campos de estudio aparte de la hidrología.

El objetivo de este trabajo es determinar, mediante técnicas isotópicas, el destino y reparto de los distintos aportes de agua (lluvia y niebla) en un bosque de fayalbrezal con especial atención a la zona no saturada. Se presentan la metodología utilizada y un avance de los primeros resultados destinados a caracterizar, desde un punto de vista hidrológico, la zona de estudio.

## 2.- Material y métodos

### 2.1.- Área de estudio

El área de estudio se localiza en el macizo de Anaga, situado en el extremo noreste de la isla de Tenerife y junto a la montaña de la Cruz de Taborno, que representa el emplazamiento más elevado dentro del parque rural de Anaga, con una altura de 1015 m s.n.m. La estación experimental está ubicada en las instalaciones que la Agencia Española de Navegación Aérea (AENA) gestiona en dicho lugar y dónde se localiza uno de los radares de apoyo a la navegación aérea existentes en las islas Canarias (X: 375 832 m Y: 3 157 237 m; 28N R zona; WGS84). En la Fig. 1 se muestra la ubicación de dicho emplazamiento. La localización geográfica de la estación, así como el hecho de estar situada en la zona más alta del macizo de Anaga, y por tanto, abierta hacia la dirección predominante del flujo en superficie, el Alisio que sopla del NE, garantiza que la mayor parte del año ésta se encuentre dentro del estratocúmulo que genera la inversión de subsidencia. Esto hace posible estudiar de forma continua las características del mar de nubes, así como todos aquellos parámetros que caracterizan el funcionamiento hidrológico del ecosistema que se desarrolla en estas condiciones de niebla casi permanente.

La vegetación de la zona es de tipo fayal-brezal con abundantes líquenes epifitos como marca de dicha exposición a la niebla. Los suelos son de origen volcánico. Presentan un horizonte superficial altamente orgánico de textura aparente (obtenida mediante dispersión con hexametáfosfato) franco-arenosa (arcilla: 13,8%; limo: 9,2%; arena: 77,1%); en profundidad el contenido en carbono disminuye (5% MO oxidable) y la textura es claramente, al tacto, de carácter arcilloso, aunque la elevada microagregación característica de los suelos volcánicos da lugar a la formación de pseudoarenas y dificulta su dispersión con métodos clásicos, que proporcionan para el horizonte profundo una textura franco-arcillo-arenoso (arcilla: 23,8%; limo: 27,3%; arena: 49,0%).

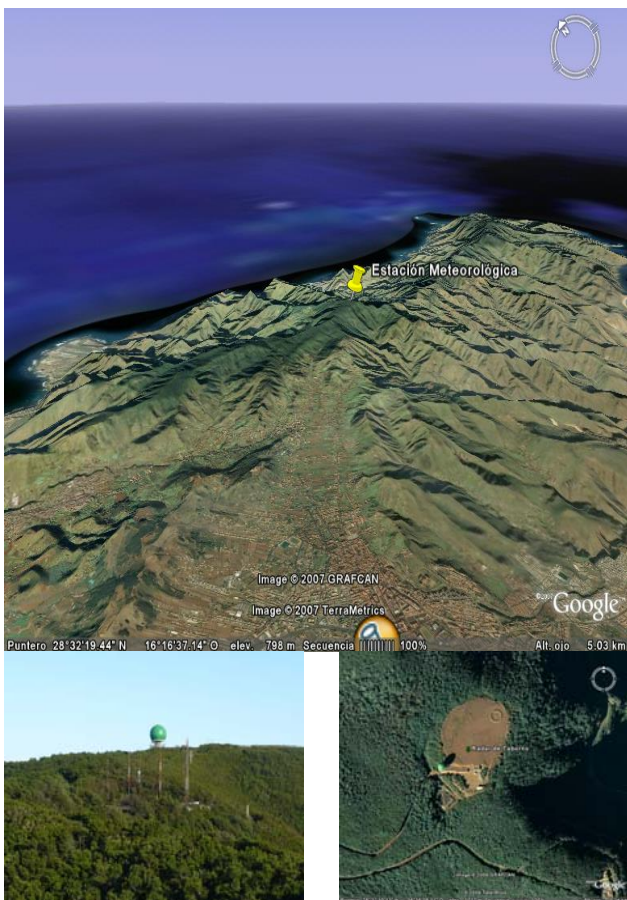


Fig. 1. Ubicación del sitio de estudio en el macizo de Anaga

## 2.2.- Medidas micrometeorológicas

Se registraron datos micrometeorológicos, medidos sobre una torre de 7 m de altura, cada minuto y almacenados en un registrador de datos Combilog (Up GmbH, Cottbus, Alemania) como medias o totales cada cuarto de hora, e instrumentada con los siguientes equipos: temperatura y humedad relativa (termohigrómetro HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Loughborough, Reino Unido); radiación global

(piranómetro SKS 1110, Skye Instruments Ltd., Powys, Reino Unido); dirección (veleta W200P, Campbell Scientific Ltd., EE. UU.) y velocidades media/máxima (anemómetro A100R, Campbell Scientific Ltd.) de viento; y lluvia incidente (pluviómetro Rain-O-Matic Professional, 0,2 mm resolución; Pronamic Bekhøi International Trading Engineering Co. Ltd., Dinamarca). Se midió la frecuencia de incidencia de niebla mediante un captador pasivo cilíndrico tipo Juvik, construido con dos capas concéntricas de malla de monofilamentos verticales de hilos de nailon ( $\varnothing=0,5$  mm; espaciado entre filamentos 2 mm), de 46 cm de alto y 20 cm de diámetro exterior, lo que implica una superficie frontal de malla expuesta al impacto de las gotas de  $1445 \text{ cm}^2$  (mitad del área total del cilindro). La salida inferior del captador se conectó mediante una manguera a un pluviómetro Rain-O-Matic para registrar el volumen de agua de niebla recogida. Los volúmenes medidos se refirieron al área efectiva de impacto ( $1445 \text{ cm}^2$ ), esto es en unidades  $\text{L m}^{-2}$  superficie malla. Aunque el captador cuenta con una cubierta que minimiza la recogida de lluvia durante fenómenos de pluviometría mixta (lluvia + niebla), los eventos en los que el pluviómetro registró lluvia se descartaron, de forma un tanto conservadora, del cómputo total de niebla, para evitar así conteos espurios como consecuencia del registro de gotas que pudieran caer oblicuamente transportadas por el viento.



Fig. 2. Estación meteorológica y captadores de niebla: pasivo cilíndrico sobre la torre y activo encima de la caseta

## 2.3.- Determinación del contenido de humedad de suelo

El contenido volumétrico de agua en el perfil de suelo se determinó mediante 8 sondas TDR Trime-EZ (Imko GmbH, Ettlingen, Alemania). Éstas cuentan con dos varillas de 16 cm de longitud separadas entre sí 4 cm, por lo que las sondas miden el contenido de humedad en un volumen de suelo de aproximadamente  $700 \text{ cm}^3$ . Los



TDR se insertaron horizontalmente a 10, 15, 25 (x2), 35 (x2), 45 y 80 cm de profundidad, donde (x2) indica profundidades duplicadas. Se tomaron lecturas de humedad de suelo con una frecuencia de 1/15 minutos y se almacenaron cada hora como medias en un registrador de datos Combilog (Up GmbH, Cottbus, Alemania).

#### 2.4.- Toma de muestras de agua para análisis isotópico

Se utiliza un colector de niebla activo (NES 215, Eigenbrodt GmbH, Alemania), para la captación de agua de niebla y su posterior análisis isotópico. El captador se comanda desde un datalogger (Campbell modelo CR200) conectado a un termohigrómetro (Campbell modelo CS215), de manera tal que se activa cuando la humedad relativa,  $RH > 95\%$ . Igualmente un pluviómetro totalizador, que se derivó mediante una manguera a una botella plástica de 5 L, sirve para recoger muestras de lluvia con las que comparar los contenidos de  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$ . En ambos casos (niebla y lluvia) se minimiza la posible evaporación desde los recipientes de recogida añadiendo un sobrenadante de vaselina líquida. Las muestras de lluvia corresponden a eventos de precipitación, por lo que la frecuencia de recogida dependerá de la duración de tales eventos. Las muestras de agua de niebla se recogen con una periodicidad semanal. Por último se obtienen muestras de agua bajo la cubierta con botellas plásticas conectadas a un embudo. Para la recogida de solución de suelo se utilizan extractores Rhizon (Rhizosphere Research Products, Holanda) insertados a tres profundidades (5, 10, 30 cm). Los extractores Rhizon están fabricados con un polímero orgánico poroso (diámetro de poro medio de  $0,1 \mu m$  y máx.  $0,2 \mu m$ ) cilíndrico de 10 cm de longitud ( $\varnothing=2,5 \text{ mm}$ ). Se aplica una succión de 70 kPa sobre el Rhizon mediante una bomba de vacío y la solución de suelo extraída se recoge en botellas de vidrio ámbar de 125 ml.



**Fig. 3.** Zanja de estudio donde se muestran las sondas TDR y extractores Rhizon insertados en el perfil de suelo

#### 2.5.- Análisis isotópico

Los análisis isotópicos se realizan en el Laboratorio de Hidrología Isotópica de la AIEA (Agencia Internacional de la Energía Atómica, Viena) siguiendo métodos

estándares establecidos. Los resultados de la composición isotópica vendrán expresados en tanto por mil respecto al estándar internacional V-SMOW (Gonfiantini, 1978).

#### 2.6.- Curvas de succión del suelo

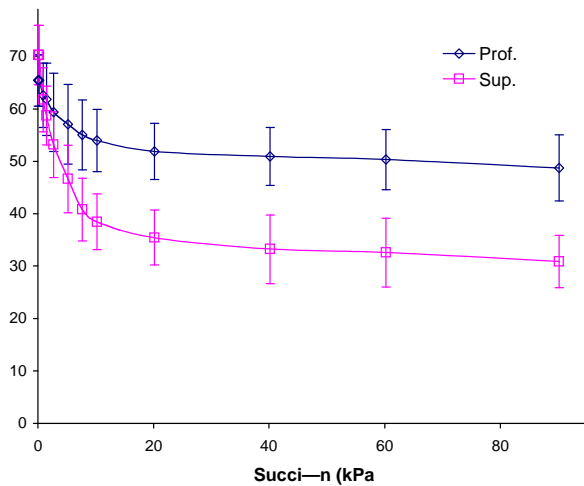
Las curvas de retención de humedad permiten comprobar el rango de agua explorada por los Rhizon y caracterizar el suelo en la parcela de estudio. Se tomaron para ello muestras inalteradas por triplicado, en superficie (5 cm) y profundidad (50 cm), en anillos de  $96,6 \text{ cm}^3$ . Se saturaron luego en el laboratorio con una solución acuosa de carbonato cálcico, timol y el humectante AquaGro-L (Aquatrols, EE.UU.), para así facilitar el mojado de las muestras orgánicas superficiales hidrófugas. Los anillos de suelo se saturaron por inmersión, elevando el nivel de agua de forma progresiva para facilitar la salida de aire atrapado. Las curvas características se determinan en cámaras cerradas y presurizadas (células Tempe) sobre placas porosas (con presión de burbujeo de 100 kPa), para las siguientes presiones,  $P= 0; 0,7; 1,3; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 20; 40; 60; 90 \text{ kPa}$ . Se mide el volumen de agua drenado, para cada incremento de presión, con probetas graduadas y se calcula así la humedad volumétrica ( $\theta, \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) de la muestra del anillo, conocido el peso seco en estufa. Así mismo se determinó la retención de agua a 1.500 kPa en una olla Richards. El conjunto de pares de datos  $\theta$  versus potencial mátrico ( $h=-P$ ) o succión ( $\psi=P$ ), determinan la curva característica del suelo.

### 3.- Resultados y discusión

#### 3.1.- Curvas características

Las curvas de succión se representan en la Fig. 4. El suelo muestra una alta retención de humedad. A saturación el contenido volumétrico de agua (expresado en %) es de  $\theta=70\pm6\%$  (superficie) y  $\theta=65\pm5\%$  (profundidad). La mayor retención en las capas someras del perfil se asocia a su marcado carácter orgánico (38% de materia orgánica oxidable). Este elevado contenido en humedad, característico de los suelos de origen volcánico con una microporosidad acusada, se mantiene a 90 kPa:  $\theta=31\pm5\%$  (superficie) y  $\theta=49\pm6\%$  (profundidad), e incluso a succiones de 1.500 kPa en el punto de marchitamiento permanente:  $\theta=28\pm4\%$  (superficie),  $\theta=39\pm1\%$  (profundidad). A medida que aumenta la succión se produce por tanto una menor cesión de agua en el horizonte profundo, debido a su mayor contenido en arcilla. En las muestras superficiales, por el contrario, se inicia una importante liberación de agua a succiones bajas de 0,1-1 kPa, denotando por tanto un comportamiento hídrico característico de suelos arenosos. En este sentido indicar que, en estudios con suelos ricos en sesquióxidos y otros Andisoles, esta pérdida de agua en el inicio de la curva de retención se atribuye no a la existencia de macroporos, como ocurriría para texturas típicamente arenosas, sino a una fuerte agregación característica de este tipo de suelos, y por tanto al drenaje del espacio de

poros entre agregados (Sharma y Uehara, 1968; El Swaify, 1980). Se mantiene sin embargo, como hemos indicado más arriba, y a diferencia de suelos arenosos, un elevado contenido de humedad a 1500 kPa, atribuible a la existencia de una marcada microestructura (Tsuji et al., 1975). En este sentido se dice que estos suelos presentan un comportamiento “híbrido” (Tomasella et al., 2000). Debido a esta pérdida importante de agua entre 1 y 10 kPa, observada en Andisoles, se ha propuesto de forma alternativa el valor de 10 kPa en lugar de 33 kPa como succión para estimar el contenido de humedad a capacidad de campo (El Swaify, 1980). Siguiendo este criterio, el rango de agua útil,  $\theta_u$ , definido como la diferencia entre  $\theta$  a 10 kPa y 1.500 kPa, toma valores relativamente pequeños:  $\theta_u=10\pm4\%$  (superficie),  $\theta_u=15\pm7\%$  (profundidad), como resulta característico de otros suelos de origen volcánico (Maeda y Soma, 1986).

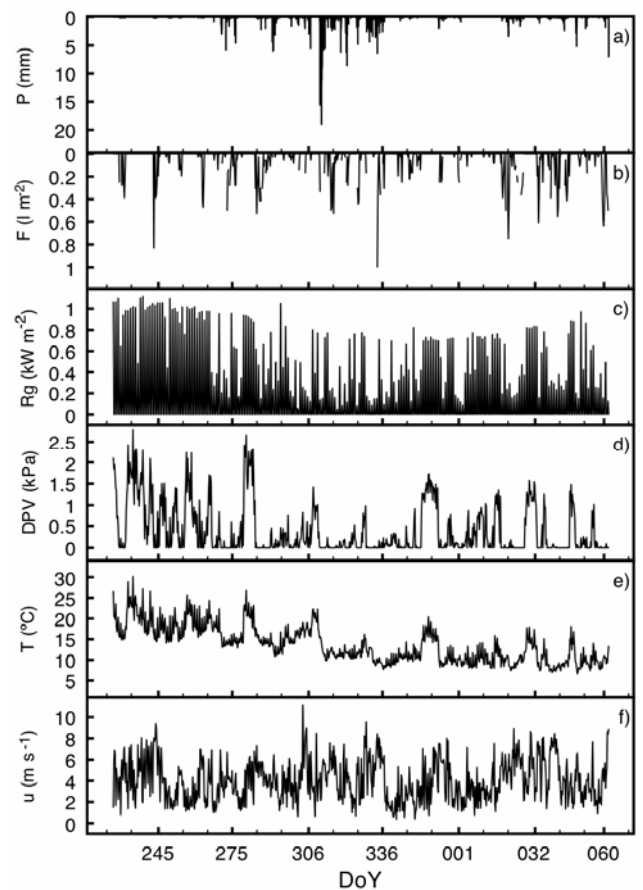


**Fig. 4.** Curvas características del suelo en superficie (5 cm) y profundidad (50 cm). Los símbolos representan valores medios de tres medidas y las barras  $\pm$  desviación estándar

### 3.2.- Variables micrometeorológicas

La Fig. 5 muestra los registros de las diversas variables medidas a intervalos de 15 minutos. La precipitación total durante el periodo 15/08/2012 – 3/03/2013 fue de 1033 mm. La mayoría de eventos de lluvia tuvieron lugar entre finales de septiembre y principios de diciembre de 2012 (Fig. 5a). Dos días en el periodo estudiado destacan por las altas precipitaciones registradas que suman unos totales diarios de 75.2 mm (18/10/2012) y 243.2 mm (7/11/2012). La captura de agua de niebla por el captador se produjo a lo largo de todo el periodo (Fig. 5b), alcanzando un total de 937,5 l m<sup>-2</sup>. En la mayoría de los eventos los valores registrados son inferiores a 20 l m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (sólo en 9 días se obtuvieron valores superiores; en el intervalo 24 – 35 l m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>). La Fig. 5c muestra que hasta mediados de octubre no sólo se registraron los valores más altos de radiación global ( $R_g=800 - 1035$  W m<sup>-2</sup>) sino que éstos además fueron más frecuentes. El periodo siguiente, hasta mediados de diciembre, se

caracteriza por una mayor frecuencia de los valores bajos de radiación ( $R_g < 400$  W m<sup>-2</sup>). El último periodo presenta mayor frecuencia de los valores comprendidos entre  $R_g=600 - 900$  W m<sup>-2</sup>. La evolución del déficit de presión de vapor, DPV, se caracteriza por un periodo hasta los primeros diez días de octubre con episodios frecuentes de alto DPV, seguido de otro periodo donde el aire presenta con frecuencia mayor grado de saturación de humedad, esto es valores de DPV bajos (Fig. 5d). La dinámica de la temperatura muestra una tendencia decreciente (Fig. 5e). Hasta finales de septiembre se observan oscilaciones entre los 15 y 30°C. A continuación, las temperaturas más frecuentes se encuentran entre los 7,5 y 15°C. A diferencia de las variables anteriores, que muestran un comportamiento acorde con las estaciones del año, la velocidad del viento presenta oscilaciones frecuentes entre los 0,5 m s<sup>-1</sup> y los 8 m s<sup>-1</sup> a lo largo de todo el periodo de estudio (Fig. 5f). Se aprecia que durante los meses de septiembre y octubre, estas oscilaciones se restringen al intervalo de 1 a 7 m s<sup>-1</sup>.



**Fig. 5.** Evolución de las variables micrometeorológicas en el periodo estudiado: a) lluvia (P); agua de niebla recogida en el captador (F); radiación global ( $R_g$ ); c) déficit de presión de vapor (DPV); d) temperatura del aire (T); e) velocidad del viento (u)

### 3.3.- Comparación de eventos de lluvia y niebla

Dado que la cantidad de niebla recogida en el captador, F (l m<sup>2</sup> malla vertical) y la lluvia, P (mm) son variables no comparables (se expresan en unidades diferentes), la

relevancia de la incidencia de niebla en la zona de estudio se aborda mediante la comparación del número de eventos de recolección de agua de niebla frente a los de lluvia. Así, durante el periodo de estudio se contabilizaron 4.706 eventos de captación de agua de niebla frente a 1.245 de agua de lluvia que se distribuyen mensualmente según se muestra en la Fig. 6. Durante los meses de septiembre hasta febrero, se alcanzan más de 500 eventos mensuales de agua de niebla, llegando a superar los 800 eventos/mes en noviembre y febrero. Sin embargo, en el mismo periodo, los sucesos de lluvia no superan los 200 eventos/mes. En general, los eventos de lluvia mensuales son inferiores al 30% de lo que suponen los eventos de recolección de agua de niebla. Únicamente en el mes de noviembre este porcentaje alcanza el 61%.

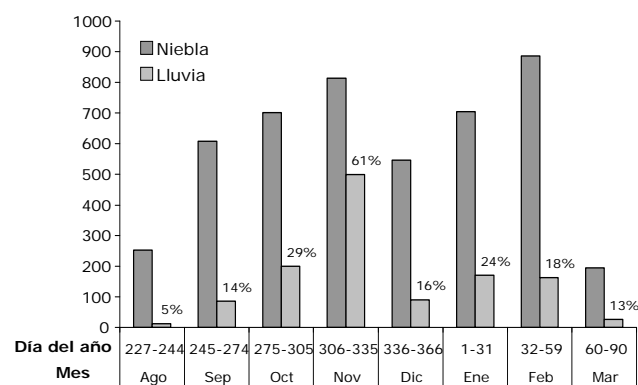


Fig. 6. Comparación del número de eventos registrados con el pluviómetro y con el captador de agua de niebla cilíndrico durante el periodo estudiado. Se indica el porcentaje que representan los eventos de lluvia con respecto de los de niebla

### 3.4.- Evolución de la humedad de suelo

La Fig. 7 muestra la distribución del contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) medio y su variación a lo largo del perfil de suelo durante todo el periodo de estudio. La Fig. 8 incluye, a modo de ejemplo, la evolución temporal de  $\theta$  en superficie (15 cm) en dos puntos de la parcela, así como el agua de niebla recolectada por el captador y la lluvia incidente medida a lo largo del intervalo 13/3/2013-11/4/2013. Puede observarse que los eventos de lluvia suficientemente intensos como para superar la capacidad de retención de la cubierta (del orden de  $> 1$  mm) se traducen en cambios casi instantáneos del contenido de agua en la superficie del suelo. Sin embargo, algunos de estos eventos (indicado con una flecha en la Fig. 8) no fueron detectados en uno de los puntos, lo que podría ser indicativo de la variabilidad espacial que impone la cubierta sobre el agua que llega al suelo. Por el contrario, la comparación de las series de agua recogida por el captador (F) y de contenido de agua en el suelo apunta a que los eventos de niebla detectados no se tradujeron en un goteo de agua de niebla interceptada por la vegetación, perceptible por los TDR superficiales instalados en la parcela.

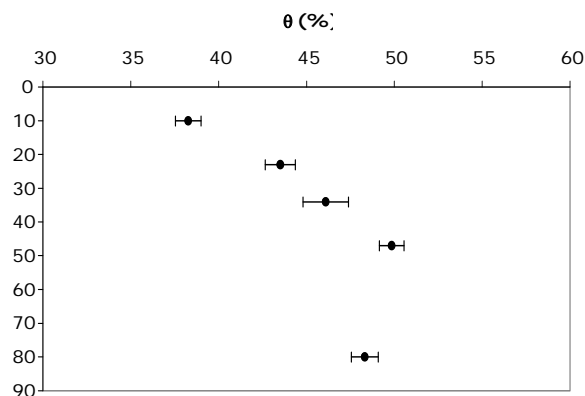


Fig. 7. Distribución de la humedad de suelo,  $\theta$ , a lo largo del perfil. Los puntos indican valores medios y las barras  $\pm$  desviación estándar

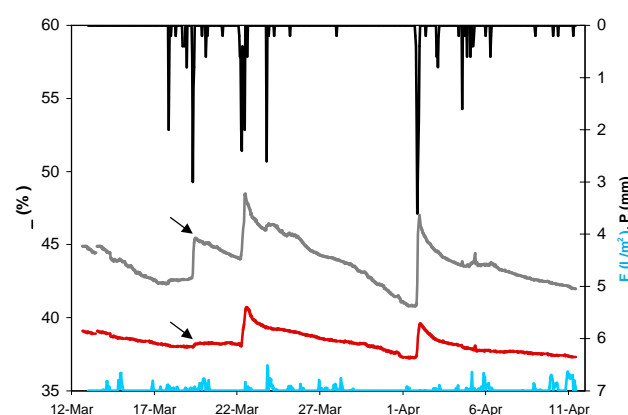


Fig. 8. Evolución temporal de la humedad de suelo ( $\theta$ ) en superficie (15 cm) (eje OY principal), del agua de la niebla captada (F) y de la lluvia (P) (eje OY secundario). Los valores de F se muestran invertidos para una mejor visualización

## 4.- Conclusiones

A pesar del número considerable de estudios que se han llevado a cabo en los bosques de laurisilva de la región de la Macaronesia con el objetivo de cuantificar el aporte de agua procedente de la interceptación y posterior precipitación del agua de niebla, la correcta evaluación e importancia relativa del aporte hídrico de la niebla sigue siendo una pregunta abierta. Este hecho se ve condicionado tanto por las técnicas hasta la fecha utilizadas como por el hecho de que la precipitación bajo la cubierta es un fenómeno espacialmente variable y por ende de difícil estimación. El estudio de la zona no saturada y la distribución a lo largo del ciclo hidrológico de las distintas masas de agua de origen atmosférico (lluvia y niebla) mediante isótopos estables se plantea como una metodología alternativa para investigar el posible papel de la niebla de estos bosques relictos presentes en Canarias.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido financiado con fondos de los siguientes proyectos: INIA-RTA2009-161, PI042005/034 y SolSubC200801000260. Los autores agradecen a ANEA el permitirles

acceso a sus instalaciones y a Sieltec Canarias S.L. por su apoyo técnico. A.R. Socorro Monzón (ICIA) llevó a cabo la determinación de las texturas y contenido en materia orgánica de los suelos.

## 5.- Bibliografía

- Aboal, J.R., 1998. Los flujos netos hidrológicos y químicos asociados en un bosque de laurisilva en Tenerife. Colección Soportes Audiovisuales e Informáticos. Serie Tesis Doctorales Curso 1997/98. Ciencias y Tecnologías. Universidad de la Laguna.
- Aboal, J.R., M.S. Jiménez, D. Morales, y P. Gil, 2000. Effects of thinning on throughfall in Canary Islands pine forest. The role of fog. *J. Hydrol.* 238, 218-230.
- Ceballos, L., y F. Ortuño, 1952. El bosque y el agua en Canarias. *Montes* 8, 418-423.
- Demoz, B., Jr. J.L. Collett, y Jr. B.C. Daube, 1996. On the Caltech active strand cloudwater collectors. *Atmos. Res.* 41, 47-62.
- El Swaify, S.A., 1980. Physical and mechanical properties of Oxisols, en *Soils with Variable Charge*, ed. Theng, B.K.G. New Zealand Society of Soil Science, Soil Bureau, Lower Hutt. Nueva Zelanda, 303-323.
- García-Santos, G., y L.A. Bruijnzeel, 2011. Rainfall, fog and throughfall dynamics in a sub-tropical ridge-top cloud forest, National Park of Garajonay (La Gomera, Canary Islands, Spain). *Hydrol. Process.* 25, 411-417.
- Gonfiantini, R., 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* 271, 534-536.
- Guerra J.C., J. Carrillo, J. Rodríguez, M.T. Arencibia, y E. Cuevas, 2007. Thermodynamic structure of the lower subtropical troposphere over the Canary Islands, en *7th Annual Meeting of the European Meteorological Society*, 4, EMS2007-A-00554.
- Höllermann, P., 1981. Microenvironmental studies in the laurel forest of the Canary Islands. *Mountain Res. Develop.* 1(3/4), 193-207.
- Kämmer F., 1974. Klima und Vegetation auf Tenerife, besonders in Hinblick auf den Nebelniederschlag. *Scripta Geobotanica* 7, 1-78.
- Katata, G., C.M. Regalado, A. Ritter, y H. Nagai, 2009. Application of a land surface model that includes fog deposition over a tree heath-laurel forest in Garajonay National Park (La Gomera, Spain), en *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo Vol IX*, ed. Silva Rojas O., Carrera Ramirez J. CIMNE: Barcelona; 393-400. <http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p372.pdf>.
- Maeda, T., y K. Soma, 1986. Physical properties. En: Ando Soils in Japan. Ed. Wada, K. Kyushu University Press, Fukuoka, Japón, 99-111.
- Marzol-Jaén, V, J. Sanchez-Megía, y G. García-Santos., 2011. Effects of fog on climatic conditions at a subtropical montane cloud forest site in northern Tenerife (Canary Islands, Spain) en *Tropical Montane Cloud Forests: Science for the Conservation and Management*, ed. Bruijnzeel L.A., Scatena F.N., Hamilton L.S. Cambridge University Press and UNESCO International Hydrology Program: Cambridge, UK, 359-364.
- Pérez de Paz, P.L., M. del Arco Aguilar, J.R. Acebes Ginovés, y W. Wildpret de la Torre, 1990. La vegetación cormofítica (vascular) del Parque Nacional de Garajonay, en *Parque Nacional de Garajonay: Patrimonio Mundial*, ed. Pérez de Paz, P.L. Excmo. Cabildo Insular de La Gomera, Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, España, 137-171.
- Prada, S., M. Menezes de Sequeira, C. Figueira, y R. Vasconcelos, 2012. Cloud water interception in the high altitude tree heath forest (*Erica arborea* L.) of Paul da Serra Massif (Madeira, Portugal). *Hydrol. Proc.* 26, 202-212. DOI: 10.1002/hyp.8126.
- Regalado, C.M., y A. Ritter, 2010a. Comment on "Fog precipitation and rainfall interception in the natural forests of Madeira Island (Portugal)". *Agric. Forest Meteorol.* 150, 133-134. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.09.008.
- Regalado, C.M., y A. Ritter, 2010b. Synthetic roving: A numerical technique to estimate fog water dripping below the canopy, en *5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*. Münster, Germany. <http://meetingorganizer.copernicus.org/FOGDEW2010/FOGDEW2010-11-1.pdf>.
- Regalado, C.M., y A. Ritter, 2013. Response to 'Reply to Comment on: "Rainfall, fog and throughfall dynamics in a subtropical ridge top cloud forest, National Park of Garajonay (La Gomera, Canary Islands, Spain) by G. García-Santos and L.A. Bruijnzeel"'. [http://aritter.webs.ull.es/Download/ResponseToHydroProcess27\\_129.pdf](http://aritter.webs.ull.es/Download/ResponseToHydroProcess27_129.pdf)
- Ritter, A., C.M. Regalado, y G. Aschan, 2008. Fog water collection in a subtropical elfin laurel forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): a combined approach using artificial fog catchers and a physically based model. *J. Hydrometeorol.* 9, 920-935. DOI: 10.1175/2008JHM992.1.
- Ritter, A., C.M. Regalado, y G. Aschan, 2009. Fog reduces transpiration in tree species of the Canarian relict heath-laurel cloud forest (Garajonay National Park, Spain). *Tree Physiol.* 29, 517-528. DOI: 10.1093/treephys/tpn043.
- Ritter A., y C.M. Regalado, 2010. Investigating the random relocation of gauges below the canopy by means of numerical experiments. *Agric. Forest Meteorol.* 150, 1102-1114. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.04.010.
- Ritter, A., y C.M. Regalado, 2013. Comment on 'García-Santos G., Bruijnzeel LA. 2011. Rainfall, fog and throughfall dynamics in a subtropical ridge top cloud forest, National Park of Garajonay (La Gomera, Canary Islands, Spain). *Hydrol. Proc.* 25, 411-417'.
- Rozanski, K., L. Araguás-Araguás, y R. Gonfiantini, 1992. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science.* 258, 981-985.
- Santana, L., 1986. Estudio de las precipitaciones de niebla. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Tenerife, ICONA.
- Scholl, M., W. Eugster, y R. Burkard, 2011. Understanding the role of fog in forest hydrology: stable isotopes as tools for determining input and partitioning of cloud water in montane forests. *Hydrol. Process.* 25, 353-366. doi: 10.1002/hyp.7762.
- Sharma, M.L., y G. Uehara, 1968. Influence of soil structure on water relations in low humic latosols: I. Water retention. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 32, 765-770.
- Tomasella, J., M.G. Donet, y L. Rossato, 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64, 327-338.
- Tsuji, G.Y., R.T. Watanabe, y W.S. Sakai, 1975. Influence of soil microstructure on water characteristics of selected Hawaiian soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 39, 28-33.