

Comparación de modelos de interceptación de agua de lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*

Comparison of rainfall interception models in isolated individuals of Pinus pinea and Cistus ladanifer

Pérez-Arellano, R.^{a1}, Moreno-Pérez, M.F.^{a2} y Roldán-Cañas, J.^{a3}

^aDepartamento de Agronomía. Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales. Edificio Leonardo da Vinci. 14071 Córdoba, E-mail: ^{a1}g82pearr@uco.es, ^{a2}mfatima@uco.es, ^{a3}jroldan@uco.es

Recibido: 22/02/2016

Aceptado: 26/04/2016

Publicado: 29/07/2016

RESUMEN

En este trabajo se realiza una comparación de varios modelos de simulación del proceso de interceptación, comúnmente utilizados en numerosos estudios, como son las versiones clásicas de Rutter y de Gash, además de la versión adaptada por Valente a bosques dispersos. El objetivo es analizar la aplicabilidad de los diferentes modelos en ejemplares aislados de dos especies de clima mediterráneo, *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. La toma de datos se ha realizado en la cuenca de “El Cabril” (Córdoba), desde octubre de 2010 a junio de 2015. Las diferencias obtenidas entre las medidas de campo y los resultados de los diferentes modelos son inferiores al 6%, siendo el modelo de Rutter en su versión original el que mejor se ajusta en pino y el modelo original de Gash el que mejor se ajusta en el caso de la jara.

Palabras clave | Modelos de interceptación; Clima mediterráneo; Individuos aislados; *Pinus pinea*; *Cistus ladanifer*.

ABSTRACT

This paper presents a comparison of several simulation models of interception process commonly used in numerous studies, such as the classic versions of Rutter and Gash, also the version of Valente adapted by sparse forests. The aim is to analyze the applicability of different models in isolated specimens of two species of Mediterranean climate, Pinus pinea and Cistus ladanifer. The data collection was carried out in the watershed of “El Cabril” (Córdoba), from October 2010 to June 2015. The differences obtained between measurements and the results of the different models are less than 6%. Original version of Rutter model and original version of Gash model present a greater adjustment for pine and for cistus respectively.

Key words | Interception models; Mediterranean climate; Isolated individuals; *Pinus pinea*; *Cistus ladanifer*.

INTRODUCCIÓN

La interceptación de lluvia por la vegetación es el proceso por el cual la precipitación incidente es interceptada por las coberturas vegetales y posteriormente es redistribuida. La lluvia que cae sobre las superficies del dosel se mantiene temporalmente y, finalmente, se evapora a la atmósfera (interceptación) o llega al suelo, ya sea por trascolación o por escorrentía cortical. La trascolación es la porción de lluvia que alcanza el suelo pasando directamente a través del dosel o por goteo después de golpear una rama u hoja (David *et al.*, 2005; Návar, 2011). La escorrentía cortical es la parte de la lluvia que fluye por las ramas y el tronco hasta llegar al suelo (Crockford y Richardson, 2000). Trascolación y escorrentía cortical juntas se denominan precipitación neta.

La interceptación está directamente relacionada con la interacción suelo-planta-atmósfera, y condiciona los procesos de infiltración, escorrentía y evaporación (Méndez, 2013). Conocer la cantidad de agua de lluvia interceptada por el dosel de la vegetación es de gran importancia en el balance hídrico de las cuencas, ya que es una parte significativa de las pérdidas de agua de los ecosistemas forestales. El proceso de interceptación depende en gran medida de la duración y la intensidad de las lluvias, de la estructura de la vegetación y de las condiciones meteorológicas que controlan la evaporación durante y después de la lluvia (Dingman, 2002). La interceptación ha sido ampliamente estudiada en bosques caducifolios y de coníferas a escala de masa forestal (Pypker *et al.*, 2011), y se ha demostrado que la estructura de la cobertura boscosa tiene un papel fundamental en la regulación de este proceso.

El clima mediterráneo del sur de Europa se caracteriza por veranos calurosos y secos, concentrándose casi toda la lluvia durante los meses de Octubre a Mayo. Los recursos hídricos son limitados y la recarga de los acuíferos y embalses tiene mucha importancia. En las áreas forestales de esta región, hay zonas donde la cobertura del dosel es discontinua, existiendo una gran variabilidad en las relaciones entre la precipitación y las pérdidas por interceptación, lo que genera una mayor complejidad en su estudio (David *et al.*, 2006; Llorens *et al.*, 2011). En zonas adeshadas, como nuestra área de estudio, donde el bosque se compone de árboles aislados intercalados con arbustos y vegetación herbácea no permanente, esta complejidad es aún mayor (Guevara-Escobar *et al.*, 2007; Mateos Rodríguez y Leco, 2010).

Son escasos los estudios de interceptación realizados en arbustos, quizá debido a que en este tipo de plantas la interceptación es claramente inferior a la que se produce, por ejemplo, en los árboles (David *et al.*, 2005). Otro motivo puede ser la dificultad de las técnicas de medición de la partición del agua de lluvia en plantas de bajo porte (Dunkerley, 2000). Sin embargo, los estudios realizados en este tipo de vegetación muestran que, a pesar de las diferencias estructurales entre arbustos y árboles, los modelos de interceptación se pueden aplicar en arbustos con igual éxito (Domingo *et al.*, 1998).

El primer intento de modelar conceptualmente el proceso de interceptación fue debido a Horton (1919). Sin embargo, hasta la década de 1970, la pérdida de la interceptación se predijo usando las relaciones obtenidas empíricamente con la precipitación bruta, como por ejemplo las ecuaciones de Merriam (1960) y Zinke (1967). Un inconveniente importante de los modelos empíricos es que, como son establecidos a partir de datos específicos, no pueden ser extrapolados a diferentes condiciones de lluvia y vegetación (Massman, 1983; Dingman, 2002). El primer modelo conceptual, después del trabajo de Horton, para describir la interceptación como un proceso controlado por la evaporación fue propuesto a principios de 1970 por Rutter *et al.* (1971). La versión completa del modelo, incluyendo la escorrentía cortical, apareció poco después (Rutter *et al.*, 1975). A partir de Rutter se derivan una serie de modelos como son el modelo analítico de Gash (1979), los modelos numéricos de Mulder (1985) y Whitehead y Kelliher (1991), y en menor medida el modelo estocástico de Calder (1986). En la actualidad, existen más de 15 modelos de interceptación con base física (Muzlyo *et al.*, 2009), siendo en algunos casos, modificaciones de los modelos originales.

Un modelo ideal de interceptación de lluvia por el árbol debe considerar tanto los factores arquitectónicos de los árboles como los factores meteorológicos que influyen en el proceso de interceptación. Los resultados de las simulaciones del modelo, además de proporcionar una estimación precisa de la interceptación árbol, deben ser capaces de distinguir la influencia de los factores de los árboles (por ejemplo, la especie, la arquitectura, la altura, la forma de la hoja y la aspereza de la superficie del tronco), los factores de precipitación (por ejemplo, la intensidad, magnitud y duración), y los factores meteorológicos (por ejemplo, velocidad del viento, dirección del viento, la radiación solar y la temperatura del aire) en los procesos de interceptación del árbol (Xiao *et al.*, 2000).

Este trabajo compara la medición y modelización de las pérdidas de interceptación aplicando diferentes modelos de interceptación de lluvia en ejemplares aislados de dos especies de clima mediterráneo, *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. Para simular

el proceso de interceptación se utilizaron las versiones originales y las reformuladas por Valente *et al.* (1997) para su aplicación en bosques dispersos, tanto del modelo de Rutter (Rutter *et al.*, 1971, Rutter *et al.*, 1975), como del modelo analítico de Gash (Gash *et al.*, 1995). Los datos obtenidos en los ejemplares instrumentalizados ubicados en una zona adeshada de la provincia de Córdoba se utilizaron para calibrar estos modelos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

Los ensayos se han realizado en la finca de “El Cabril”, que pertenece al municipio de Hornachuelos (Córdoba). “El Cabril” tiene un área de 11.26 km² y sus coordenadas geográficas son 38°4’N y 5°25’O (Figura 1).

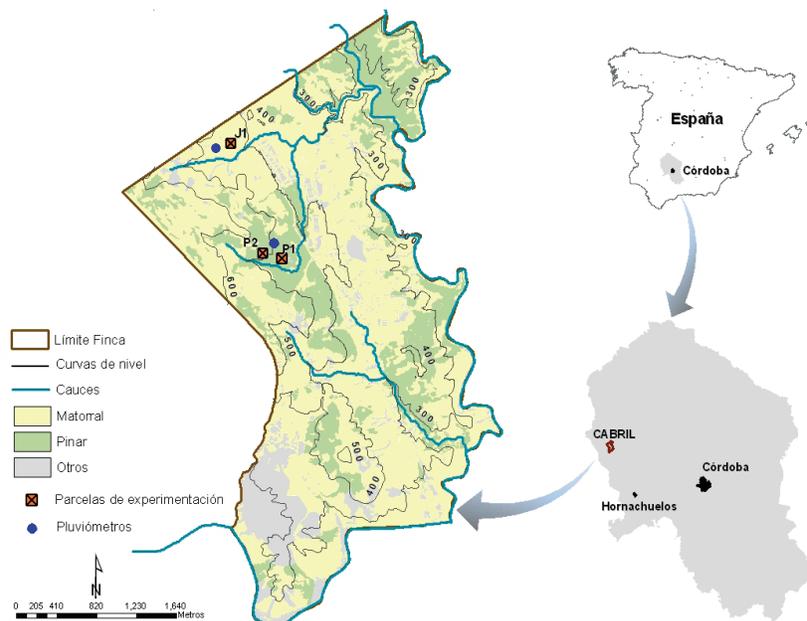


Figura 1 | Localización de la finca de “El Cabril”.

El clima de la zona de estudio ha sido definido como mediterráneo continental semi-árido y se caracteriza por presentar veranos calurosos y secos e inviernos moderadamente fríos. La temperatura media anual de la zona está próxima a los 16°C, con valores máximos entre 37 y 41°C, y mínimos entre -1 y 3°C. La precipitación anual media está en torno a los de 500 mm, aunque su distribución varía considerablemente a lo largo del año, siendo Diciembre el mes más húmedo (con una media de 73 mm/mes) y Julio y Agosto los meses más secos (con una media de 4 mm/mes).

Datos experimentales

Para obtener los datos de interceptación se instrumentalizaron tres ejemplares (Tabla 1), dos de *Pinus pinea* y otro de *Cistus ladanifer*, en los que se realizaron las medidas de campo de los diversos componentes del balance de agua. Los datos fueron recogidos desde octubre de 2010 hasta junio de 2015.

Tabla 1 | Características de los ejemplares estudiados.

Individuo	Latitud	Longitud	Altura (m)	Dbh (diámetro a la altura del pecho) (m)	Área de proyección del dosel (m ²)	Altitud (m)	Orientación	Pendiente (%)
<i>Pinus pinea</i> (I)	38.076°N	5.421°O	8.7	0.39	33.1	458.1	Sureste	28
<i>Pinus pinea</i> (II)	38.076°N	5.421°O	8.8	0.43	34.1	461.4	Sureste	27.6
<i>Cistus ladanifer</i>	38.087°N	5.427°O	1.9	0.05	0.78	410.3	Sur	40

Para medir la trascolación en los ejemplares de *Pinus pinea*, se dispone en cada una de ellos de 8 pluviómetros manuales de 9.3 cm de diámetro situados aleatoriamente en el suelo formando dos anillos concéntricos a una distancia del tronco de 1/3 y 2/3 del radio máximo del dosel, colocándose 4 pluviómetros en cada uno, con el objetivo de obtener información de la mayor parte del dosel. Se instalaron además 6 canaletas de 2 m de largo y 20 cm de ancho, situadas de forma radial justo por debajo del dosel. Estas canaletas nos aportan una segunda medida de la trascolación, en teoría más precisa que la anterior ya que la superficie de recogida es mayor. Finalmente, se instalaron dos pluviómetros automáticos, que nos permiten, además de contrastar la medida de los pluviómetros manuales y de las canaletas, obtener los parámetros de los modelos de interceptación del dosel para eventos individuales de lluvia, al tratarse de una medida continua. La escorrentía cortical es medida mediante una manguera cortada longitudinalmente y sellada alrededor del tronco, al que previamente se le ha realizado una inserción en forma de espiral. El agua recogida por esta manguera es conducida a un pluviómetro automático. Las medidas en el segundo pino se realizaron a partir de Septiembre de 2013.

La medida de la trascolación en *Cistus ladanifer* se obtiene gracias a un recipiente colector que cubre toda la base del arbusto y conduce el agua recogida hacia un depósito a través de una manguera. Para medir la escorrentía cortical se ha colocado un recipiente sellado alrededor del tronco de la planta, que recoge el agua que fluye por el mismo, siendo conducida igualmente con una manguera hacia un depósito colector (Moreno-Pérez *et al.*, 2014).

La cantidad de precipitación interceptada (en cada evento registrado) se ha determinado indirectamente aplicando la Ecuación (1) a partir de la diferencia entre la precipitación bruta y la fracción de lluvia que pasa a través del dosel de la vegetación (precipitación neta), que se divide en trascolación y escorrentía cortical:

$$I = P_g - T_f - S_f \quad (1)$$

siendo I la interceptación, P_g la precipitación bruta; T_f la trascolación y S_f la escorrentía cortical.

Para la aplicación de los modelos de interceptación son necesarios datos horarios de parámetros climáticos tales como la velocidad del viento, la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la precipitación bruta, que han sido tomados de una estación agroclimática instalada en la zona de estudio. Para la medida directa de la capacidad de almacenaje y la evaporación del agua interceptada son necesarias técnicas que proporcionen una información continua para poder distinguir de esta manera los distintos eventos de precipitación que tienen lugar (Teklehaimanot y Jarvis, 1991). Identificar los diferentes eventos de lluvia es fundamental a la hora de determinar los parámetros que posteriormente se introducirán en los modelos de interceptación.

Comparación de las medidas de trascolación en *Pinus pinea*

Debido a la gran variabilidad espacial de la trascolación, la forma más habitual de medirla es mediante un muestreo intensivo utilizando una serie de pluviómetros de embudo localizados al azar debajo de las copas de los árboles (Gómez *et al.*, 2002). Otras formas mediante las que se cuantifican el flujo de trascolación y drenaje foliar son: canaletas (Loescher *et al.*, 2002), extensómetros (Huang *et al.*, 2004), parches de captación (Pypker *et al.*, 2005) o mediante dispositivos que abarquen la mayor parte de la cobertura de la copa (Guevara-Escobar *et al.*, 2007).

Con el fin de comparar los tres métodos de medida de trascolación instalados (canaletas, pluviómetros manuales, pluviómetros automáticos), se realizó un análisis de varianza de las medidas tomadas en campo de los eventos de precipitación que tuvieron lugar durante el experimento en cada uno de los ejemplares de pino.

Es necesario realizar una comprobación de que los tres métodos de medida nos dan resultados válidos para así poder utilizar el que sea más conveniente según el estudio que se vaya a realizar. Los datos que se han obtenido se han analizado con diferentes test estadísticos. Primeramente se realizó el test de normalidad de Shapiro-Wilks, para comprobar la normalidad del conjunto de datos de trascolación recogidos (Fernández Escobar *et al.*, 2010). Una condición necesaria para poder comparar las medias de varios grupos es que las varianzas de cada grupo deben ser iguales, es decir, las dispersiones de los datos no deben diferir entre los grupos a comparar. Para realizar esta comprobación se utilizó el test de Levene (Levene, 1960) utilizando el software “R Project” (Venables *et al.*, 2015), con el que es posible determinar si se cumple la hipótesis de homocedasticidad. Se dice que un modelo predictivo presenta homocedasticidad cuando la varianza del error de la variable endógena se mantiene a lo largo de las observaciones, es decir, cuando la varianza de los errores es constante. Finalmente se realiza el análisis de varianza que nos dará la información necesaria para poder decir si los tres métodos utilizados permiten obtener mediciones estadísticamente similares de la trascolación.

Modelos de interceptación

El número total de parámetros del modelo varía de un modelo a otro, si bien todos incluyen parámetros que representa la capacidad de almacenamiento del dosel (S) y del tronco (S_t). En los modelos originales y modificados de Rutter y de Gash, estos se definen como la cantidad mínima de lluvia interceptada que es necesaria para saturar el dosel y el tronco, respectivamente. Estos parámetros cambian según el modelo. Por ejemplo, se refiere a la totalidad del área de estudio en el caso de los modelos originales de Rutter y Gash, mientras que en el caso de los modelos para parcelas de vegetación dispersa de Valente, se refiere sólo a la parte de la parcela cubierta por la vegetación. También aparecen parámetros que describen la estructura de la cubierta, como son el coeficiente de trascolación libre (p) y el coeficiente de reparto de escorrentía cortical (p_t), que se emplean para particionar la lluvia. En las versiones modificadas para casos de parcelas con vegetación dispersa, el coeficiente de trascolación libre se determina como $(1 - c)$, siendo c el porcentaje de cubierta de las copas. Para el cálculo de las pérdidas de interceptación es fundamental determinar la evaporación potencial (E_p), que se ha obtenido utilizando la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965).

El cálculo de los parámetros S y p se realiza siguiendo la metodología propuesta por Klaassen *et al.* (1998), a partir de la representación gráfica de la precipitación bruta (P_g) frente a la interceptación correspondiente a eventos individuales precedidos por 8 horas sin lluvia (tiempo supuestamente necesario para que se seque completamente el dosel). El gráfico de dispersión se divide en dos partes: una donde los eventos saturan el dosel, $P_g \geq P'_g$, siendo P'_g la precipitación necesaria para alcanzar la saturación, y otra donde los eventos de lluvia son insuficientes para saturar el dosel, $P_g < P'_g$. La interceptación durante la fase de humedecimiento vendrá expresada por la Ecuación (2):

$$P_g < P'_g : I = P_g(1-p) \quad (2)$$

Adicionalmente, la interceptación cuando se produce la saturación del dosel viene dada por la Ecuación (3):

$$P_g \geq P'_g : I = \alpha P_g + \beta \quad (3)$$

siendo α la tasa de evaporación (E_p/P_g) y β la capacidad de almacenamiento del dosel (S).

Los parámetros que caracterizan al fuste (S_t y p_t) se obtienen de una única gráfica en la que se representa la escorrentía cortical frente a la precipitación bruta, considerando en este caso eventos precedidos de 24 h sin lluvia ya que el fuste necesita más tiempo que el dosel para secarse. La pendiente de la recta que se ajusta a los puntos representados nos dará el valor de p_t y, al igual que en el caso del dosel, S_t se corresponderá con el punto de corte de la recta de ajuste con el eje de ordenadas.

Los modelos modificados de Valente requieren del mismo número de parámetros que las versiones originales, incluyendo además un coeficiente de reparto del drenaje (p_d). Este parámetro se estimó a partir de la regresión lineal entre la escorrentía cortical y la expresión $(T_f - (1 - c)P_g)$, de acuerdo con el método descrito por Valente *et al.* (1997).

En este trabajo se han hecho algunas modificaciones a los modelos para adaptarlos a la vegetación utilizada y las características climáticas de la zona, consistentes en establecer límites a la evaporación desde el tronco y a la evaporación desde el dosel en ambas versiones. También se han considerado los límites establecidos en el drenaje de la cubierta propuestos en un trabajo anterior de Gerrits (2010). La interceptación de las precipitaciones se calcula como la suma de agua evaporada de todos los intervalos desde el inicio del evento de lluvia hasta que el modelo supone que el dosel está completamente seco.

Para identificar la importancia y la naturaleza de la influencia de los parámetros de los modelos en la estimación de las pérdidas de interceptación, se realizó un análisis de sensibilidad evaluando el efecto que provoca la variación de cada parámetro manteniendo constantes todos los demás: es el llamado análisis de sensibilidad “one-factor-at-a-time” (Saltelli y Annoni, 2010).

El modelo de Rutter

El modelo Rutter representa el proceso de interceptación mediante un balance de agua, de tal forma que hay una entrada de lluvia, un posterior almacenamiento y una salida final en forma de drenaje y evaporación, y se encuentra esquematizado en la Figura 2, incluidas las modificaciones propuestas en este trabajo y que se comentan al final de este apartado. Las intensidades de drenaje y evaporación dependen de la cantidad de agua almacenada en el dosel, que varía a lo largo del evento, y se estiman a partir de variables y parámetros tanto meteorológicos como de la masa forestal.

La precipitación bruta (P_g) se divide en tres componentes principales: trascolación libre, siendo ésta el producto del coeficiente de trascolación (p) por la precipitación; precipitación incidente en el fuste, calculada como el producto del parámetro que representa la proporción de lluvia que se desvía hacia el tronco (p_t) por la precipitación, de modo que, cuando la cantidad de agua que incide en el fuste (C_f) supera a la capacidad de almacenamiento del mismo (S_f), se produce un nuevo flujo denominado escorrentía cortical (S_c); por último, la cantidad de lluvia que incide en el dosel, se calcula como el producto de la precipitación bruta por la proporción restante ($1 - p - p_t$). Al igual que en el caso del fuste, cuando la cantidad de lluvia que incide en el dosel (C) supera la capacidad de almacenamiento del mismo (S) se produce el drenaje desde dosel, el cual, junto con la trascolación libre, forman la trascolación total. La evaporación potencial desde el fuste se ve afectada por un factor ϵ , que relaciona la evaporación desde los troncos con la existente en el dosel.

El modelo estima la trascolación, escorrentía cortical e interceptación a partir de la precipitación bruta y la evaporación en el dosel y en el fuste, basándose en un cálculo del balance de agua en el dosel y el fuste, a partir de las ecuaciones (4) y (5):

$$(1 - p - p_t) \int P_g dt = \int D dt + \int E_c dt + \Delta C \quad (4)$$

$$p_t \int P_g dt = S_f + \int E_t dt + \Delta C_t \quad (5)$$

donde D es el drenaje del dosel, E_c es la intensidad de evaporación de agua interceptada por el dosel, ΔC es el cambio en el almacenamiento del dosel, E_t es la intensidad de evaporación del agua interceptada por el fuste y ΔC_t es el cambio en el almacenamiento del fuste.

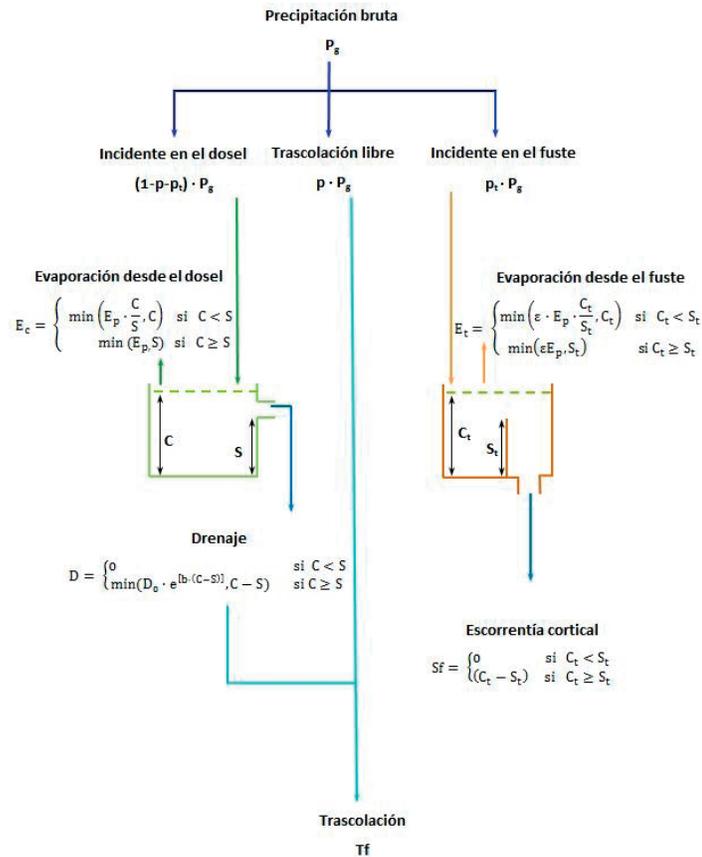


Figura 2 | Adaptación del Modelo de Rutter en el presente trabajo.

La tasa de goteo o de drenaje del dosel (D) vendrá dada por la siguiente expresión (Ecuación 6):

$$D = \begin{cases} \min(D_s \cdot \exp[b \cdot (C - S)], C - S) & \text{si } C \geq S \\ 0 & \text{si } C < S \end{cases} \quad (6)$$

donde D_s es la tasa de drenaje cuando $C=S$, y b es coeficiente empírico. El parámetro D_s , se obtiene como $3.91 \times 10^{-5} S$ (mm/min) y b como $3.89 S^{-1}$ (mm⁻¹) (Rutter y Morton, 1977).

En caso de la evaporación desde el dosel, en determinados eventos horarios en los que la intensidad de evaporación sea elevada, se obtiene como resultado que la evaporación desde el dosel es mayor que la cantidad de lluvia incidente en el mismo, lo cual es imposible. Por tanto, se han fijado los límites para que en ese tipo de eventos (Moreno-Pérez et al., 2014), si la precipitación incidente en el dosel es inferior a la cantidad de agua que puede almacenar entonces se evapora todo el agua que incide y, si por el contrario, se satura el dosel, la cantidad de agua que se evapora sea como máximo la cantidad de agua que es capaz de retener el dosel (Ecuación 7).

$$E = \begin{cases} \min(E_p, S) & \text{si } C \geq S \\ \min\left(E_p \cdot \frac{C}{S}, S\right) & \text{si } C < S \end{cases} \quad (7)$$

En el caso de la evaporación desde el fuste ocurre igual que con la evaporación desde el dosel, es decir, pueden existir eventos en los que la cantidad de lluvia que se evapora desde el fuste sea superior a la cantidad que incide en el mismo. Por tanto, se han propuesto unos límites a la evaporación desde el fuste de modo que la evaporación nunca sea superior a la cantidad de lluvia que incide sobre él o a la cantidad de lluvia que es capaz de retener (Ecuación 8).

$$E_t = \begin{cases} \min(\varepsilon \cdot E_p, S_t) & \text{si } C_t \geq S_t \\ \min\left(E_p \cdot \frac{C}{S}, S\right) & \text{si } C < S \end{cases} \quad (8)$$

Otro motivo por el que se han introducido estas modificaciones es porque al aplicar el modelo original, es muy frecuente que la suma de las pérdidas por interceptación totales, la trascolación y la escorrentía cortical excedan a la precipitación bruta, incluso en los casos en los que no se dan los errores anteriormente descritos.

El modelo de Gash

Casi una década después de que se desarrollara el modelo original de Rutter, Gash (1979) presentó el primer modelo analítico de interceptación, proporcionando una solución simplificada para el modelo Rutter. La principal diferencia entre estos modelos es que el modelo de Rutter es un modelo físicamente basado, que utiliza el balance hídrico como aproximación para el entendimiento del proceso de interceptación de lluvia, mientras que el modelo analítico de Gash se caracteriza por ser un conjunto de expresiones matemáticas que describen el proceso basándose en relaciones empíricas del análisis de los fenómenos que tienen lugar en la interceptación de la lluvia (Tabla 2).

El modelo de Gash representa la entrada de lluvia (P_g) como una serie de tormentas discretas que están separadas por intervalos de tiempo suficientemente largos para que el dosel y el tronco se sequen por completo. Cada tormenta individual se divide en tres fases: humedecimiento del dosel, saturación y secado. El modelo analítico realiza el cálculo considerando de forma independiente la evaporación posterior al evento de lluvia, el efecto de las pequeñas tormentas insuficientes para saturar el dosel, el humedecimiento del dosel y la evaporación desde los troncos.

Los valores medios de la intensidad de lluvia (\bar{P}_g) y la tasa de evaporación (\bar{E}) se calculan para todo el período de simulación para las condiciones de dosel saturado y después se aplican de forma generalizada a todos los eventos de lluvia individuales. El proceso de evaporación se ve afectado por varios factores: la cantidad de tiempo necesaria para que el dosel se sature y la intensidad de evaporación aplicable bajo estas condiciones, la capacidad de saturación del dosel y el tiempo que tarda en secarse tras un evento de precipitación. Este modelo trabaja con valores medidos a una escala diaria, suponiendo un único evento de precipitación por día.

Tabla 2 | Componentes del modelo de interceptación de lluvia de Gash.

Componente de la interceptación	Formulación
Cantidad de lluvia necesaria para saturar el dosel (P'_g)	$-\left(\frac{\bar{P}_g S}{\bar{E}}\right) \ln \left\{ 1 - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{P}_g}\right) (1 - p - p_t)^{-1} \right\}$
Pérdidas por interceptación desde el dosel	
Para m tormentas pequeñas insuficientes para saturar el dosel ($P_g < P'_g$)	$(1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m (P_{gj})$
Para n tormentas suficientemente grandes para saturar el dosel ($P_g \geq P'_g$)	$n(1 - p - p_t)P'_g + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{P}_g}\right) \sum_{j=1}^n (P_{gj} - P'_g)$
Pérdidas por interceptación desde los troncos	
Para q tormentas que saturan el tronco ($P_g \geq S_t/p_t$)	qS_t
Para n+m-q tormentas que no saturan el tronco ($P_g < S_t/p_t$)	$p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_{gj}$
Escorrentía cortical	$p_t \sum_{j=1}^q P_{gj} - qS_t$
Trascolación	$p \sum_{j=1}^{m+n} P_{gj} + \left[(1 - p - p_t) - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{P}_g}\right) \right] \sum_{j=1}^n (P_{gj} - P'_g)$

Modelos reformulados de Valente

Las versiones clásicas tanto del modelo de Rutter como de Gash, suponen que el follaje se encuentra bastante cerrado y que además se extiende sobre toda el área de análisis, existiendo solo pequeños vacíos entre una especie vegetal y otra. Esto se traduce en que la evaporación es uniforme y que el almacenamiento en el follaje y en los troncos se extiende sobre toda el área. Valente *et al.* (1997) observó que al aplicar estos modelos en zonas donde existieran grandes vacíos en la vegetación, se sobreestimaba la proporción de lluvia interceptada, por lo que realizó algunas variaciones con la intención de poder aplicar dicho modelo en bosques poco densos. Los modelos propuestos por Valente son más complejos, ya que necesitan más datos de entrada en comparación con los modelos clásicos.

Un cambio fundamental es que la intensidad de evaporación de las superficies húmedas ya no se calcula para toda el área, sino sólo para la que está cubierta por el dosel. Al mismo tiempo, se introdujeron algunas correcciones menores, como modificar las condiciones de contorno en los modelos originales, ya que el dosel modelado almacenaba agua más allá de la capacidad de almacenamiento.

Ambas versiones convergen a los modelos originales cuando el porcentaje de cubierta de las copas (c) se aproxima a la unidad.

RESULTADOS

Medidas de interceptación

Un total de 87 eventos de lluvia fueron identificados y analizados en *Pinus pinea* I y 38 en *Pinus pinea* II, mientras que en *Cistus ladanifer* fueron 66. No se han podido registrar algunos eventos por causas diversas, como el desbordamiento de la capacidad de los depósitos o la rotura de los recipientes en los períodos de temperaturas extremas. En la Tabla 3 se muestran los valores totales de precipitación bruta, trascolación, escorrentía cortical y pérdida de interceptación obtenidos en las ejemplares de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. En dicha tabla aparecen reflejados las medidas de trascolación recogidas con cada uno de los métodos empleados en *Pinus pinea* durante el periodo 2013-2015: canaletas (Can.), pluviómetros manuales (Pluv. man.) y pluviómetros automáticos (Pluv. aut.), así como la media obtenida y el porcentaje de interceptación (I/P_g). La interceptación total en estos cinco años fue de 764.6 mm en pino y de 280.3 mm en jara, lo que representa el 29.9% y el 16.4% de la precipitación bruta recogida en cada ejemplar, respectivamente. Se ha observado además que ambos individuos de *Pinus pinea* interceptan prácticamente el mismo volumen (518.1 mm en el pino I y 514.6 mm en el pino II) durante el período de estudio 2013-2015.

Tabla 3 | Valores de las medidas acumuladas de precipitación bruta, trascolación, escorrentía cortical e interceptación para el período de Octubre de 2010 a Junio de 2015.

Individuo	P_g (mm)	Tf (mm)				S_f (mm)	I (mm)	I/Pg (%)
		Can.	Pluv. man.	Pluv. aut.	Media			
<i>Pinus pinea</i> I (2010-2013)	1739.8	-	1266.2	-	1266.2	6.2	467.4	26.9
<i>Pinus pinea</i> I (2013-2015)	816.9	496.3	520.5	537.5	518.1	1.6	297.2	36.4
<i>Pinus pinea</i> I (Total)	2556.7	-	-	-	1784.3	7.8	764.6	29.9
<i>Pinus pinea</i> II (2013-2015)	816.9	505.2	507.8	524.0	514.6	0.8	301.5	36.9
<i>Cistus ladanifer</i>	1711.5	-	934.6	-	934.6	496.6	280.3	16.4

Comparación de las medidas de trascolación en *Pinus pinea*

Tras realizar el test de normalidad de Shapiro-Wilk, se observó que los datos de trascolación medidos no se distribuían de manera normal ni en el pino I (p -valor=0.004739) ni en el pino II (p -valor=0.007049), por lo que fue necesario recurrir

a una conversión. Mediante una transformación de los datos a la raíz cuadrada se pudo salvar la restricción de la normalidad (p -valor=0.1682 en pino I y p -valor=0.2338 en pino II).

En los resultados del test de Levene, realizado para comprobar si se cumple la hipótesis de homocedasticidad, se observa como el valor de p es mayor al 5% (p -valor=0.7135 para pino I y p -valor=0.9085 para pino II), por lo que se acepta la hipótesis de homogeneidad de varianzas, es decir que los tres conjuntos de datos presentan homocedasticidad.

Finalmente se realiza el análisis de varianza, cuyos resultados muestran que no existen diferencias significativas entre los promedios de la trascolación recogida con los tres métodos en el pino I ($F=0.16$ y $gl=2$, p -valor=0.853), llegando a la misma conclusión en el caso del pino II ($F=0.071$ y $gl=2$, p -valor=0.931), ya que los dos individuos son similares y se encuentran cercanos.

Modelos de interceptación

En la Tabla 4 se muestran los valores de los parámetros de los modelos estimados de acuerdo con los procedimientos descritos anteriormente. En los pinos los valores de los parámetros se han obtenido a partir de las medidas de los pluviómetros automáticos, ya que al tratarse de una medida continua era factible distinguir los diferentes eventos de lluvia. Se observa una mayor capacidad de almacenamiento del dosel (S) y una menor capacidad de almacenamiento en el tronco (S_t) de *Pinus pinea* con respecto a *Cistus ladanifer*.

Tabla 4 | Valores estimados de los parámetros para las especies *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*.

Parámetro	<i>Pinus pinea</i> (I)	<i>Pinus pinea</i> (II)	<i>Cistus ladanifer</i>
p	0.07	0.17	0.62
S (mm)	2.37	2.21	0.9
p_t	0.001	0.004	0.18
S_t (mm)	0.004	0.008	0.09
p_d	0.001	0.005	0.5

Los resultados obtenidos con las versiones originales y para bosques dispersos del modelo de Rutter y del modelo de Gash se muestran en la Tabla 5. Para determinar la capacidad predictiva de los modelos seleccionados para la simulación del proceso de interceptación, se ha calculado la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$, mm) (Legates y McCabe, 1999).

Tabla 5 | Resultados obtenidos de la aplicación de los diferentes modelos en *Pinus pinea* I y II y en *Cistus ladanifer* (el valor entre paréntesis es la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$, mm) entre los valores estimados y los observados de T_p , S_t e I).

Modelo (<i>Pinus pinea</i> I) 2010-2013	T_p (mm)	S_t (mm)	I (mm)
Rutter (1975)	1285.2 (5.43)	5.7 (0.08)	448.9 (5.46)
Rutter mod. Valente (1997)	1311.8 (5.70)	5.2 (0.06)	422.8 (5.63)
Gash (1979)	1314.0 (5.70)	4.8 (0.08)	421.0 (5.67)
Gash mod. Valente (1997)	1319.1 (5.49)	4.9 (0.07)	415.8 (5.52)
Modelo (<i>Pinus pinea</i> I) 2013-2015	T_p (mm)	S_t (mm)	I (mm)
Rutter (1975)	562.9 (3.17)	2.7 (0.05)	251.3 (3.72)
Rutter mod. Valente (1997)	578.4 (3.14)	2.2 (0.04)	236.6 (3.76)
Gash (1979)	582.3 (3.12)	2 (0.05)	232.6 (3.75)
Gash mod. Valente (1997)	582.6 (3.14)	1.9 (0.05)	232.4 (3.75)
Modelo (<i>Pinus pinea</i> II) 2013-2015	T_p (mm)	S_t (mm)	I (mm)
Rutter (1975)	547.5 (2.7)	1 (0.02)	268.4 (3.42)
Rutter mod. Valente (1997)	559.6 (2.9)	0.6 (0.02)	256.7 (3.49)
Gash (1979)	562.5 (3.1)	0.6 (0.02)	253.8 (3.44)
Gash mod. Valente (1997)	562.6 (3.1)	0.5 (0.02)	253.8 (3.43)
Modelo (<i>Cistus ladanifer</i>)	T_p (mm)	S_t (mm)	I (mm)
Rutter (1975)	1165.5 (8.2)	313.9 (2.1)	232.1 (2.9)
Rutter mod. Valente (1997)	1419.3 (9.9)	87.6 (4.0)	204.6 (3.1)
Gash (1979)	1184.1 (8.0)	288.8 (2.0)	238.6 (2.8)
Gash mod. Valente (1997)	1447.6 (10.0)	87.1 (4.0)	176.8 (3.3)

A continuación se ha realizado un análisis de sensibilidad (Rojas *et al.*, 1996) con el que será posible determinar qué parámetros del modelo que mejor se ha ajustado a cada una de las especies, son los que ejercen una mayor influencia en el cálculo de la interceptación. En el caso de los pinos, se analizó la sensibilidad de la interceptación a las variables del modelo de Rutter original: capacidad de almacenamiento del dosel (S) y del tronco (S_t) y los coeficientes de trascolación libre (p) y de reparto de escorrentía cortical (pt) y el parámetro de la tasa de drenaje (D_s). En esta ocasión, la interceptación mostró una mayor sensibilidad ante la variación de la capacidad de almacenamiento del dosel, de forma que un cambio relativo de +50% en S resulta en un aumento de casi 20% en la pérdida estimada de interceptación (ver Figura 3a). En el caso de la jara, se realizó el análisis de sensibilidad a las mismas variables en el modelo de Gash, exceptuando la tasa de drenaje, ya que es una variable que no aparece en este modelo. La interceptación en este caso mostró la sensibilidad más alta frente a la variación del coeficiente de trascolación (ver Figura 3b).

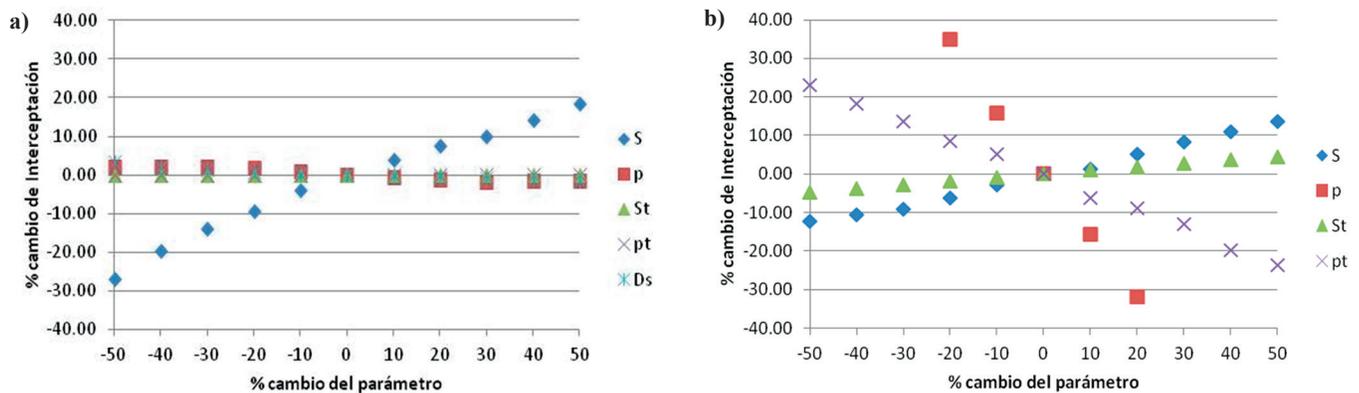


Figura 3 | Sensibilidad de la interceptación a diferentes parámetros del modelo de Rutter original en *Pinus pinea* (a) y del modelo de Gash original en *Cistus ladanifer* (b).

DISCUSIÓN

Medidas de interceptación

El estudio de la redistribución de las precipitaciones en las especies estudiadas permitió contrastar la importancia de las diferentes estructuras del dosel en la partición del agua de lluvia. Por ejemplo, mientras la escorrentía cortical es insignificante en *Pinus pinea*, en *Cistus ladanifer* es sustancial, lo que se debe principalmente a la diferencia de altura que existe entre estas plantas, ya que la mayor altura de los árboles hace que el agua tenga que recorrer más longitud y se produzcan pérdidas por la tortuosidad (rozamiento) con las ramas y el tronco. Además, el porcentaje de escorrentía cortical medio obtenido en *Cistus ladanifer* (16.4% de la precipitación bruta) es uno de los valores más altos en arbustos leñosos que se encuentran en la bibliografía, lo que parece estar relacionado con la disposición particular de sus ramas, dada su geometría característica en forma de embudo. Por ejemplo, en áreas mediterráneas, Bellot (1989) estimó un porcentaje de 4.1% para *Arbutus unedo* y de 1.3% para *Phillyrea angustifolia* L., mientras que Domingo *et al.* (1994) encontraron que la escorrentía cortical representó el 7.2% de *Cistus laurifolius* y el 4.4% para *Adenocarpus decorticans*.

El porcentaje de trascolación medido en *Cistus ladanifer* (54.6% T_p) fue inferior al obtenido en el estudio realizado por Simões *et al.* (2009) durante dos años en Évora (Sur de Portugal) para la misma especie (79% T_p) y al obtenido para *Cistus salvifolius* (61% T_p) en ese mismo estudio. Además, la interceptación es inferior a la de otro arbusto mediterráneo estudiado por Domingo *et al.* (1994) *Cistus laurifolius* (28% I). Esta variación puede ser resultado de las diferencias en la estructura de la cubierta, ya que las características de *Cistus ladanifer*, como son sus matas de follaje escaso distribuidos verticalmente y sus huecos grandes en el dosel, hacen que disminuya su capacidad de interceptación (Simões *et al.*, 2008).

Pinus pinea mostró una pérdida de interceptación de lluvia más alta debido a su mayor volumen de material verde (hojas, ramas y troco). Nuestros resultados son similares a los obtenidos en un clima mediterráneo pirenaico por Llorens *et al.* (1997) para *Pinus sylvestris* (24% I), en Barcelona, España, y de los obtenidos por Ibrahim *et al.* (1982) de *Pinus Pinea* (27% I) en Petit-Saint-Jean, Francia, donde se da un clima mediterráneo muy influido por el viento del norte, el mistral, mientras que difieren de los de Iovino *et al.* (1998), que obtuvieron una interceptación en *Pinus nigra* del 47% en un clima mediterráneo continental (Don Bruno, Italia). Esto demuestra que en especies con una arquitectura similar pueden existir diferencias en el proceso de interceptación, a pesar de encontrarse todas ellas en un clima mediterráneo, ya que en cada región se dan unas condiciones climáticas propias.

Comparación de las medidas de trascolación en *Pinus pinea*

El test de normalidad de Shapiro-Wilk aplicado a los datos originales proporcionó un valor de $p < 0.05$, por lo que no se acepta la hipótesis de que los datos se ajustan a una distribución normal. Dado que las series presentan una asimetría positiva se recomienda transformaciones del tipo de raíces cuadradas o logaritmos para conseguir que la variable adopte una distribución normal. En este caso, basta con transformar la serie mediante la raíz cuadrada para conseguir el objetivo de normalidad a un nivel de significación del 95%.

El análisis realizado posteriormente mediante el test de Levene con los datos transformados, permite aceptar la hipótesis de igualdad entre las medias de los grupos establecidos (trascolación de los diferentes métodos de medida), ya que el valor de p es mayor al 5%, es decir, las varianzas son homogéneas y no hay diferencias entre grupos.

Finalmente el análisis de varianza determinó que no existe diferencia significativa entre la medición de la interceptación con los tres métodos estudiados. Este resultado permite afirmar que utilizando cualquiera de los tres métodos se obtienen mediciones estadísticamente similares de la trascolación, de ahí que cualquiera de ellos puede considerarse válido para la determinación de los diferentes parámetros de los modelos.

Modelos de interceptación

García Apaza (2005) obtuvo un valor de capacidad de almacenamiento del dosel en *Pinus pinea* similar al de este estudio ($S=3.69$ mm), mientras que Saxena (1986) en un bosque de pinos en Uppsala ($S=2.1$ mm, $p=0.49$) y Bringfelt y Harsmar (1974) en un bosque de coníferas en la cuenca de Velen, Suecia ($S=2$ mm, $p=0.5$) publicaron valores que difieren de nuestros resultados, debido a que en estos trabajos las medidas fueron realizadas a escala de parcela y no en árboles aislados. Para *Cistus ladanifer*, hemos obtenido un valor superior al de García-Estríngana (2011), que en sus experimentos realizados en laboratorio obtuvo una capacidad de almacenamiento media de 0.54 mm para ocho plantas de esta especie. En este caso la diferencia en los resultados obtenidos podría deberse a la utilización de series de datos de corta duración que no reflejan la variabilidad anual de precipitaciones como ocurre en nuestro trabajo.

En nuestro caso, tanto en *Pinus pinea* como en *Cistus ladanifer*, las versiones originales de los modelos subestimaron la interceptación, por lo que al simular con las versiones modificadas por Valente, los resultados han sido peores que los obtenidos con los modelos originales. Las versiones de los modelos de Valente están pensadas para su aplicación en bosques con vegetación dispersa, y no resultan aplicables por tanto en ejemplares aislados, de ahí que en nuestro caso los resultados obtenidos con sus modelos no mejoren a los originales.

El criterio establecido para determinar el modelo que mejor se ajusta consiste en seleccionar el que muestre valores más bajos de *RMSE* en la variable *I*. Atendiendo a dicho criterio, el modelo de Rutter en su versión original, aunque subestima ligeramente la interceptación que tiene lugar en *Pinus pinea*, es el que mejor se ajusta en ambos árboles. En *Cistus ladanifer* es el modelo de Gash en su versión original el que mejor se ajusta a los valores de interceptación observados, seguido de la versión original del modelo de Rutter.

Las variaciones encontradas en la interceptación son menores que en los parámetros, lo cual supone una baja sensibilidad, exceptuando la variación del coeficiente de trascolación libre en el modelo de Gash original, con la que la interceptación muestra

variaciones mayores a las del parámetro. En ambos modelos, los parámetros S y S_i muestran variaciones en el mismo sentido que la variación de la interceptación, y los restantes en sentido contrario.

Rutter y Morton (1977) y Gash (1979) demostraron que los errores en la estimación de la interceptación en gran medida podrían atribuirse al efecto del error en la estimación de la evaporación. Como los modelos de interceptación utilizados en este estudio dieron valores de interceptación que no difieren en exceso de los medidos durante los eventos para las especies estudiadas, el método de Penman-Monteith para el cálculo de la evaporación puede suponerse adecuado en nuestro caso.

CONCLUSIONES

La aplicación de los modelos de interceptación de lluvia más representativos, Gash, Rutter, y sus versiones modificadas por Valente para el caso de bosques dispersos, en tres individuos de las dos especies predominantes en la cuenca hidrológica de “El Cabril”, *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*, ha conducido a ajustes más que notables, ya que las diferencias entre las medidas tomadas en campo y los resultados de los modelos son inferiores al 6%.

A partir de los parámetros meteorológicos y de vegetación derivados para el análisis de los modelos de pérdida de interceptación, se observa una mayor capacidad de almacenamiento del dosel y una menor capacidad de almacenamiento del fuste en *Pinus pinea* respecto a *Cistus ladanifer*, valores acordes a las características de cada especie.

Los resultados de este trabajo permiten concluir que no existen diferencias significativas entre los promedios de la trascolación recogida con los tres métodos de medida, por lo que se puede afirmar que con cualquiera de ellos se obtendrán valores similares de trascolación.

En el caso de *Pinus pinea*, el modelo original de Rutter es el que muestra unos valores más ajustados a los medidos en campo, siendo el modelo de Gash en su versión original el que mejor se ajusta en *Cistus ladanifer*. El análisis de sensibilidad realizado muestra que es recomendable ser lo más preciso posible a la hora de determinar los parámetros de los modelos, especialmente en el caso de la capacidad de almacenamiento del dosel en el modelo de Rutter y el coeficiente de trascolación libre en el modelo de Gash.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación “Balance hídrico superficial en la cuenca hidrológica de El Cabril” financiado por ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos) y la Universidad de Córdoba. Los autores desean expresar su agradecimiento al personal del Departamento de Ingeniería de Suelos de ENRESA por su continua y eficaz colaboración.

REFERENCIAS

- Bellot, J. 1989. *Análisis de los flujos de deposición global, trascolación, escorrentía cortical y deposición seca en el encinar mediterráneo de l'Avic (Sierra de Prades, Tarragona)*. Ph.D. Thesis. Universidad de Alicante, 300 pp.
- Bringfelt, B., Harsmar, P.O. 1974. Rainfall interception in a forest in the Velen hydrological representative basin. *Nordic Hidrology*, 5(3), 146-165.
- Calder, I.R. 1986. A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 89(1-2), 65-71. doi:10.1016/0022-1694(86)90143-5

- Crockford, R.H., Richardson, D.P. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16-17), 2903–2920. doi:10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17%3C2903::AID-HYP126%3E3.0.CO;2-6
- David, T.S., Gash, J.H.C., Valente, F., Pereira, J.S., Ferreira, M.I., David, J.S. 2006. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes*, 20(13), 2713–2726. doi:10.1002/hyp.6062
- David, J.S., Valente F., Gash J. 2005. Evaporation of intercepted rainfall. In: Anderson, M. (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley and Sons. Ltd., 627–634 (Chapter 43). doi:10.1002/0470848944.hsa046
- Dingman, S. 2002. *Physical Hydrology*. Prentice Hall, Upper Saddle River. 646 pp.
- Domingo, F., Puigdefábregas, J., Moro, M.J., Bellot, J. 1994. Role of vegetation cover in the biogeochemical balances of a small afforested catchment in southeastern Spain. *Journal of Hydrology*, 159(1-4), 275–289. doi:10.1016/0022-1694(94)90261-5
- Domingo, F., Sánchez, G., Moro, M., Brenner, A., Puigdefábregas, J. 1998. Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3-4), 275–292. doi:10.1016/S0168-1923(98)00068-9
- Dunkerley, D. 2000. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes*, 14(4), 669–678. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(200003)14:4%3C669::AID-HYP965%3E3.0.CO;2-I
- Fernández Escobar, R., Trapero, A., Domínguez, J. 2010. *Experimentación en agricultura*. Servicio de Publicaciones y Divulgación. Sevilla: Consejería de Agricultura y Pesca, 350 pp.
- García Apaza, E. 2005. *Balace de agua y carbono en un ecosistema mediterráneo de costa*. Ph.D. Thesis, Universidad de Alicante. 259 pp.
- García-Estríngana, P. 2011. *Efectos de diferentes tipos de vegetación mediterránea sobre la hidrología y la pérdida de suelo*. Ph.D. Thesis, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares (Madrid). 170 pp.
- Gash, J. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(443), 43–55. doi:10.1002/qj.49710544304
- Gash, J., Lloyd, C., Lachaud, G. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170(1-4), 79–86. doi:10.1016/0022-1694(95)02697-N
- Gerrits, A.M.J. 2010. *The role of interception in the hydrological cycle*. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Holanda. 124 pp.
- Gómez, J.A., Vanderlinden, K., Giráldez, J.V., Fereres, E. 2002. Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, 55(1), 53–70. doi:10.1016/S0378-3774(01)00181-0
- Guevara-Escobar, A., González-Sosa, E., Véliz-Chávez, C., Ventura-Ramos, E., Ramos-Salinas, M. 2007. Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated *Ficus benjamina* tree in an urban area. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 532–541. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.017
- Horton, R. 1919. Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, 47, 603–623. doi:10.1175/1520-0493(1919)47%3C603:RI%3E2.0.CO;2
- Huang, Y. S., Chen, S. S., Lin, T. P. 2004. Continuous monitoring of water loading of trees and canopy rainfall interception using the strain gauge method. *Journal of Hydrology*, 311(1-4), 1–7. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.036
- Ibrahim, M., Rapp, M., Lossaint, P. 1982. Economie de l'eau d'un écosystème à *Pinus pinea* L. du litoral Méditerranéen. *Annals of Forest Science*, 39(3), 289–306. doi:10.1051/forest:19820306
- Iovino, F., Cinnirella, S., Veltri, A., Callegari, G. 1998. Processus hydriques dans des écosystèmes forestiers. *Ecologie*, 29(1–2), 369–375.

- Klaassen, W., Bosveld F., de Water E. 1998. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 212–213, 36–50. doi:10.1016/S0022-1694(98)00200-5
- Legates, D.R., McCabe, G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241. doi:10.1029/1998WR900018
- Levene, H. 1960. Robust tests for equality of variances. In I. Olkin et al. (eds.) *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*, Stanford University Press, 278-292.
- Llorens, P., Latron, J., Álvarez-Cobelas, M., Martínez-Vilalta, J., Moreno, G. 2011. Hydrology and biogeochemistry of Mediterranean forest. *Forest Hydrology and Biogeochemistry. Ecological Studies*, 216, 301-319. doi:10.1007/978-94-007-1363-5_14
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., Gallart, F. 1997. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, 199(3-4), 331-345. doi:10.1016/S0022-1694(96)03334-3
- Loeschner, H., Powers, J., Oberbauer, S. 2002. Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 18(3), 397-407. doi:10.1017/S0266467402002274
- Massman, W. 1983. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forest. *Agricultural Meteorology*, 28(3), 261–286. doi:10.1016/0002-1571(83)90031-6
- Mateos Rodríguez, A.B., Leco, F. 2010. Distribución espacial de la lluvia sobre el suelo en la dehesa: influencia de la poda del arbolado. *Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario*, 24(3-4), 41-51.
- Méndez Monroy, E. 2013. *Metodología para la medición de variables hidrometeorológicas que faciliten la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia en el contexto Colombiano*. Ph.D. Thesis, Universidad Nacional de Colombia. 154 pp.
- Merriam, R. 1960. A note on the interception loss equation. *Journal of Geophysical Research*, 65(11), 3850–3851. doi:10.1029/JZ065i011p03850
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. In *Symposium of the Society of Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Moreno-Pérez M.F., Serrano-Gómez A., Roldán J. 2014. Application of interception models in a watershed with Mediterranean type climate. *EGU General Assembly*. Viena (Austria).
- Mulder, J.P.M. 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: B.A. Hutchison and B.B. Hicks (Editors). *The Forest-Atmosphere Interaction*. D. Reidel, Dordrecht, Netherlands, 177-196. doi:10.1007/978-94-009-5305-5_12
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente, F., Keizer, J.J., Domingo F., Gash, J. 2009. A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370(1-4), 191–206. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.058
- Návar, J. 2011. Stemflow Variation in Mexico’s Northeastern Forest Communities: Its Contribution to Soil Moisture and Aquifer Recharge. *Journal of Hydrology*, 408(1-2), 35–52. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.07.006
- Pypker, T.G., Bond, B.J., Link, T.E., Marks, D., Unsworth, M.H. 2005. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and forest Meteorology*, 130(1-2), 113–129. doi:10.1016/j.agrformet.2005.03.003
- Pypker, T.G., Levia, D.F., Staelens, J., Van Stan, J.T. 2011. Canopy Structure in Relation to Hydrological and Biogeochemical Fluxes. *Forest Hydrology and Biogeochemistry. Ecological Studies*, 216, 371-388. doi:10.1007/978-94-007-1363-5_18
- Rojas, R., Roldán, J., López Luque, R., Alcaide, M., Camacho, E. 1996. El riego del olivar en la provincia de Jaén (II): Programación de riegos. *Ingeniería del Agua*, 3(1), 43-52. doi:10.4995/ia.1996.2691

- Rutter, A.J., Kershaw, K., Robins, P., Morton, A. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest. I. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9, 367–384. doi:10.1016/0002-1571(71)90034-3
- Rutter, A.J., Morton, A., Robins, P. 1975. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, 12(1), 367–380. doi:10.2307/2401739
- Rutter, A.J., Morton, A. 1977. A predictive model of rainfall interception in forests. III: Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology*, 14(2), 567–688. doi:10.2307/2402568
- Saltelli, A., Annoni, P. 2010. How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1508–1517. doi:10.1016/j.envsoft.2010.04.012
- Saxena, R.K. 1986. Estimation of Canopy Reservoir Capacity and Oxygen-18 Fractionation in Throughfall in a Pine Forest. *Nordic Hydrology*, 17, 251–260.
- Simões, M.P., Madeira, M., Gazarini, L. 2008. The role of phenology, growth and nutrient retention during leaf fall in the competitive potential of two species of Mediterranean shrubs in the context of global climate changes. *Flora*, 203(7), 578–589. doi:10.1016/j.flora.2007.09.008
- Simões, M.P., Madeira, M., Gazarini, L. 2009. Ability of *Cistus* L. shrubs to promote soil rehabilitation in extensive oak woodlands of Mediterranean areas. *Plant Soil*, 323(1), 249–265. doi:10.1007/s11104-009-9934-z
- Teklehaimanot, Z., Jarvis, P.G. 1991. Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. *Journal of Applied Ecology*, 28(2): 603–618. doi:10.2307/2404571
- Whitehead, D., Kelliher F.M. 1991. A canopy water balance model for a *Pinus radiata* stand before and after thinning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55(1-2), 109–126. doi:10.1016/0168-1923(91)90025-L
- Valente, F., David J., Gash J. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190(1-2), 141–162. doi:10.1016/S0022-1694(96)03066-1
- Venables W. N., Smith D.M., R Core Team. 2015. *An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics*. R Development Core Team. 99 pp.
- Xiao, Q., Mcpherson, E.G., Ustin, S.L., Grismer, M.E. 2000. A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research*, 105(D23), 29173–29188. doi:10.1029/2000JD900343
- Zinke, P. 1967. Forest interception studies in the United States. In: Sopper, W., Lull, H. (Eds.), *International Symposium on Forest Hydrology*. Pergamon, Oxford, 37–161.